

# 电机学

## 交流电机绕组及其感应电动势

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1

旋转电机的基本作用原理

2

交流绕组

3

绕组的感应电动势

4

谐波电动势及其削弱方法





- 旋转电机的基本结构

定子（铁芯、绕组）

转子（铁芯、绕组）

气隙

## 绕组

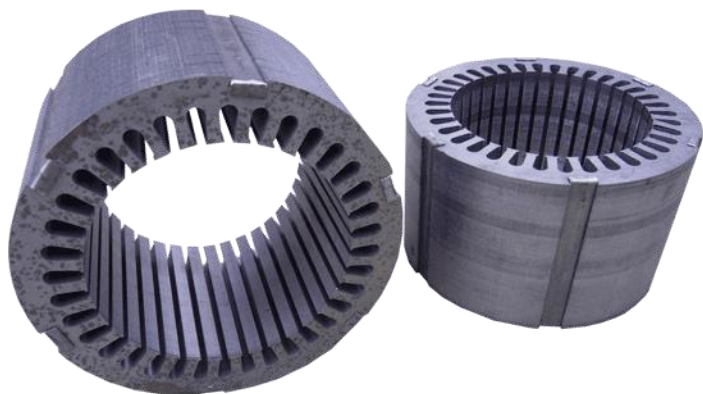
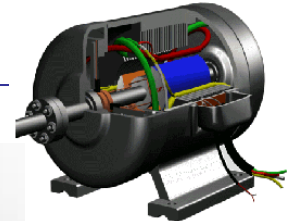
- 励磁绕组——通入电流产生磁场
- 电枢绕组——与磁场有相对运动，产生感应电动势，同时绕组中的电流与磁场相互作用产生电磁转矩，实现机电能量转换

根据电枢绕组中的电流，分为交流电机和直流电机

交流电机根据转速是否为同步转速分为同步电机和异步电机



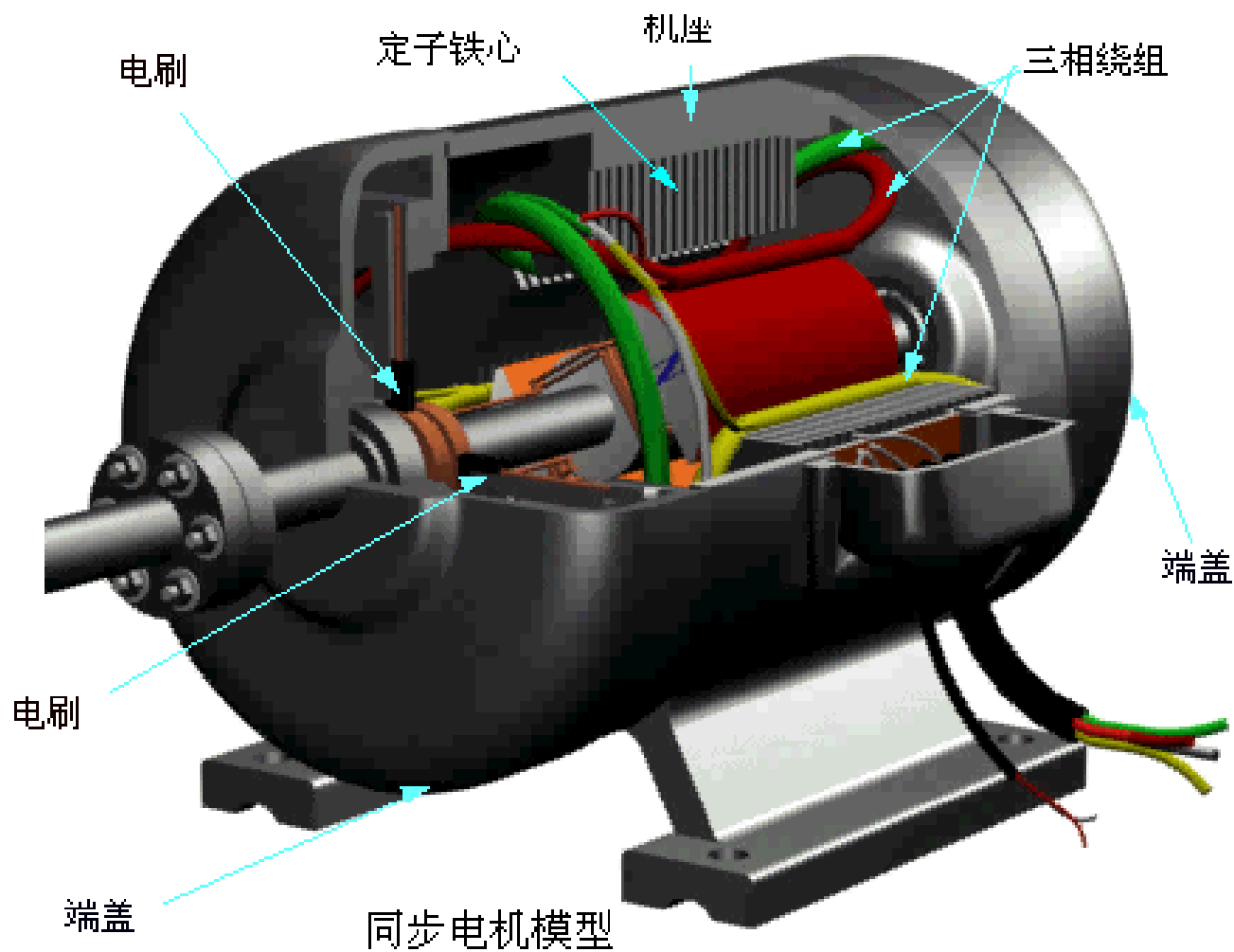
# 旋转电机的基本作用原理

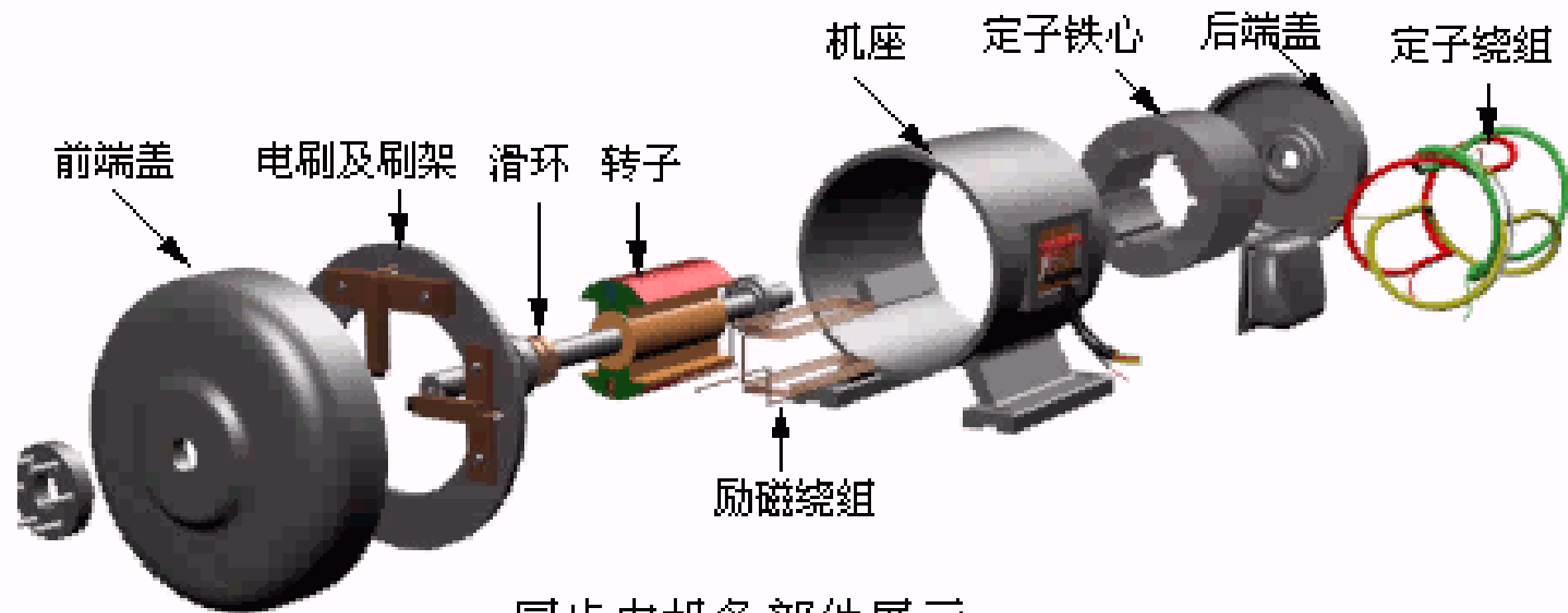
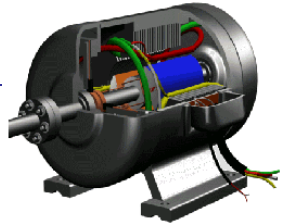




## •同步电机

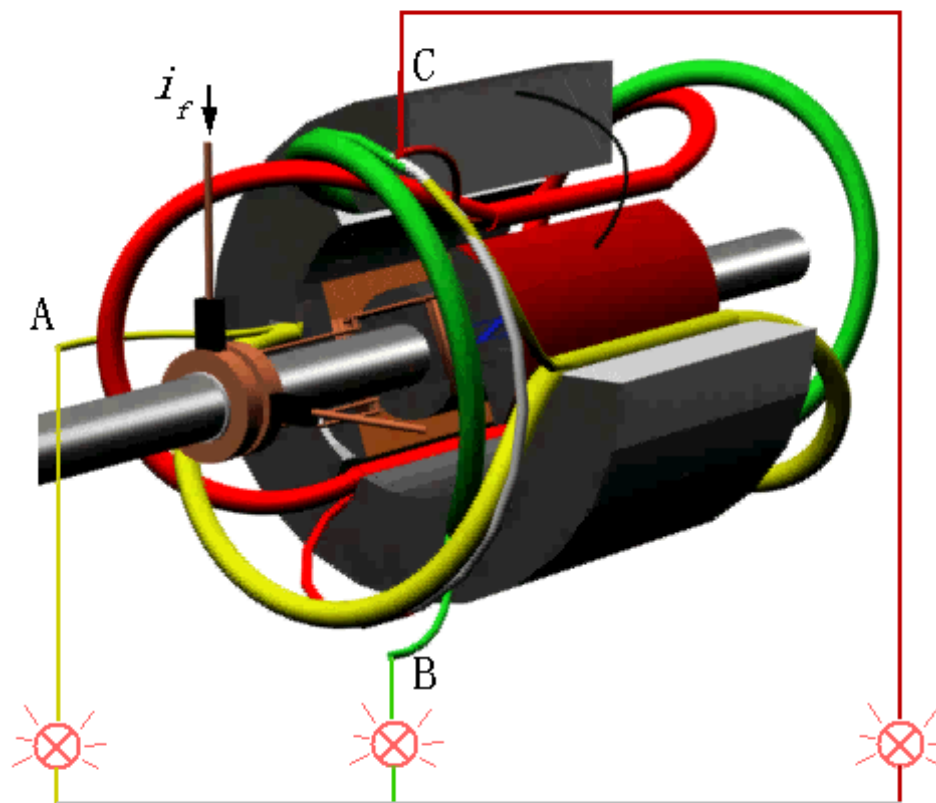
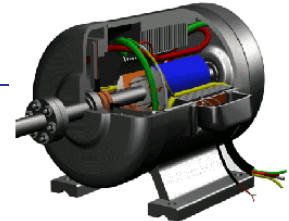
定子上为三相对称绕组，匝数相同，空间位置互差 $120^\circ$ ，转子上装有励磁绕组，通入直流电将产生一个磁场，它匝链定子各绕组



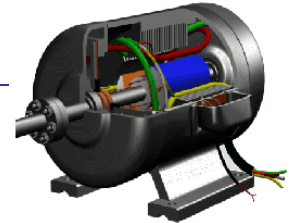


同步电机各部件展示

# 旋转电机的基本作用原理



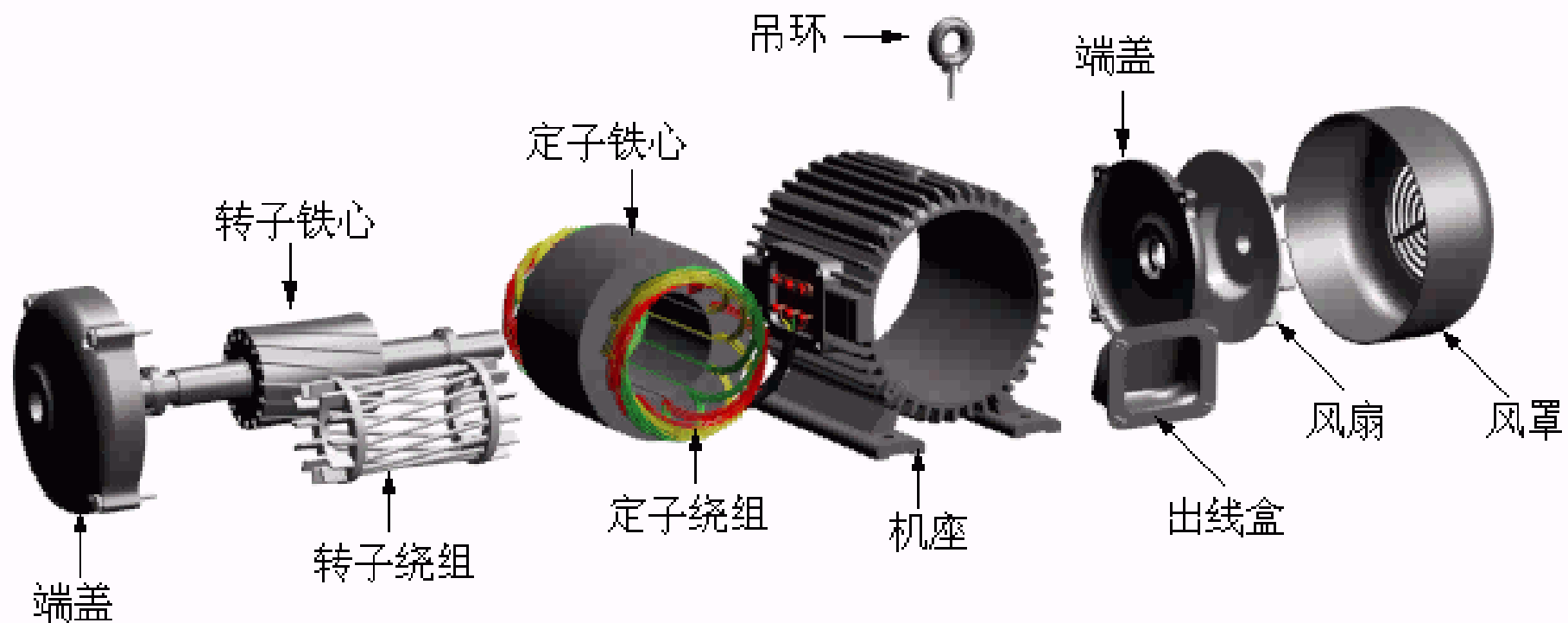
## 异步电机

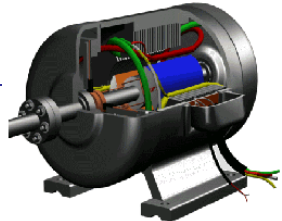






## 异步电机





## 异步电机

- 异步电动机定子上有三相对称的交流绕组；
- 三相对称交流绕组通入三相对称交流电流时，将在电机气隙空间产生旋转磁场；
- 转子绕组的导体处于旋转磁场中；
- 转子导体切割磁力线，并产生感应电势，判断感应电势方向。
- 转子导体通过端环自成闭路，并通过感应电流。
- 感应电流与旋转磁场相互作用产生电磁力，判断电磁力的方向。
- 电磁力作用在转子上将产生电磁转矩，并驱动转子旋转。
- 根据以上电磁感应原理，异步电动机也叫感应电动机。

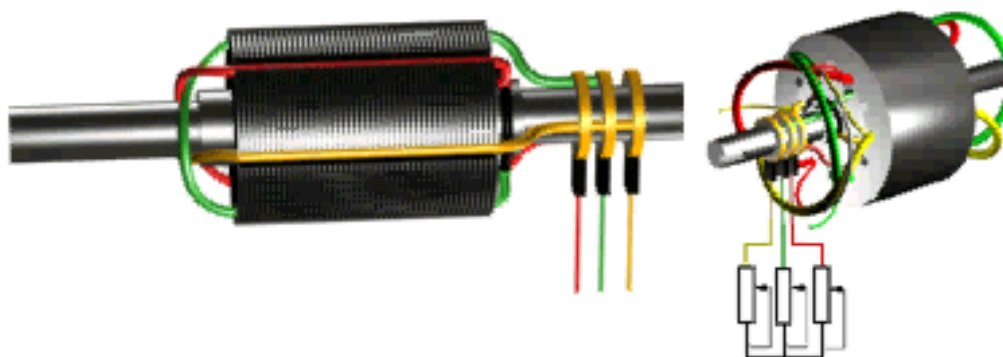


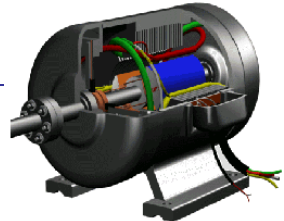


## 鼠笼型异步电机转子

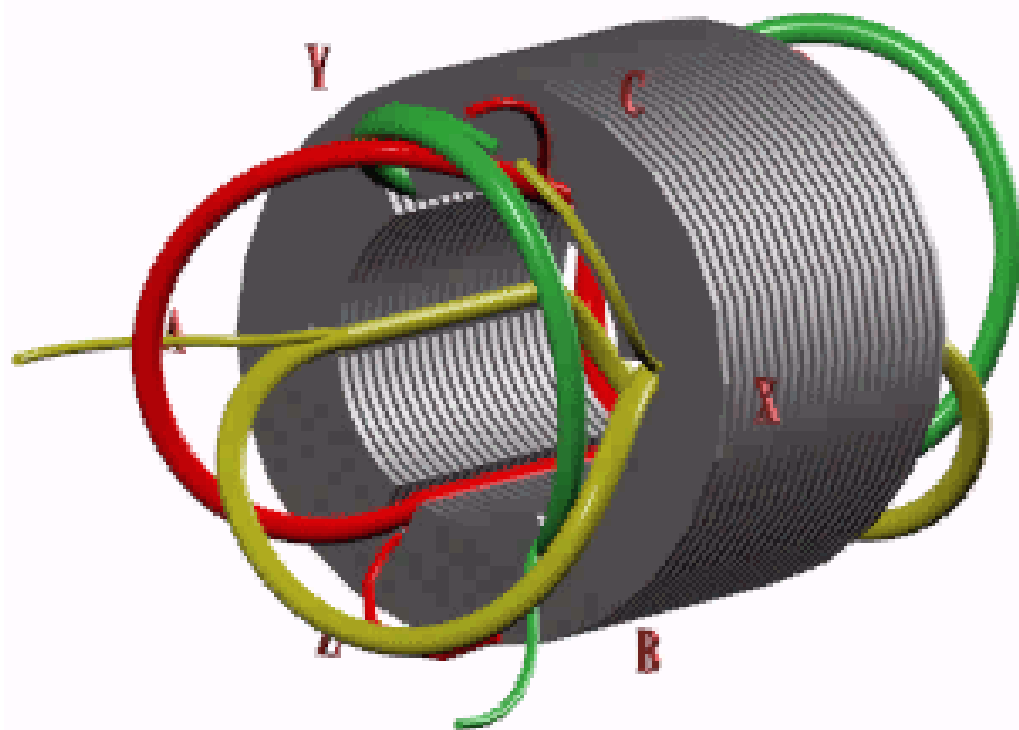


## 绕线型异步电机转子



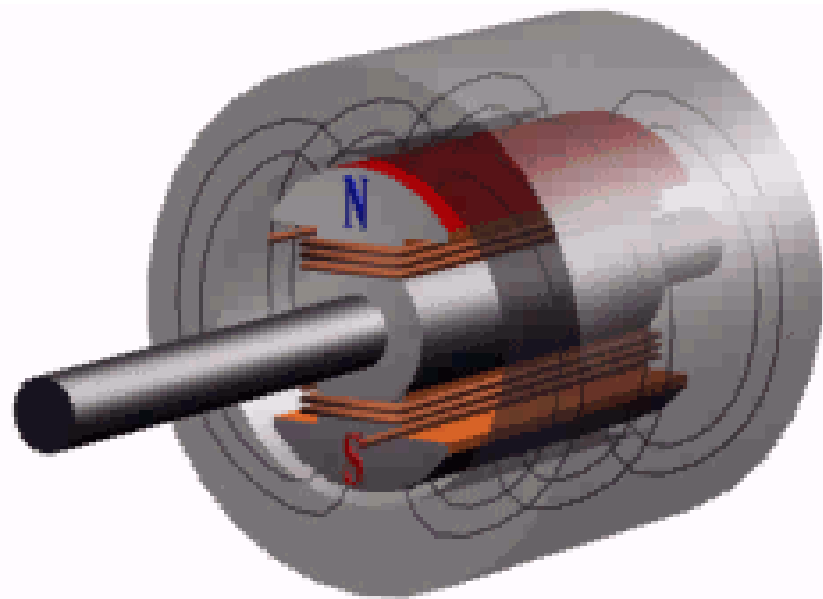
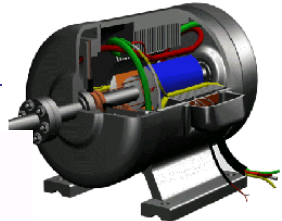


## 同步电机与异步电机主要结构部件对比



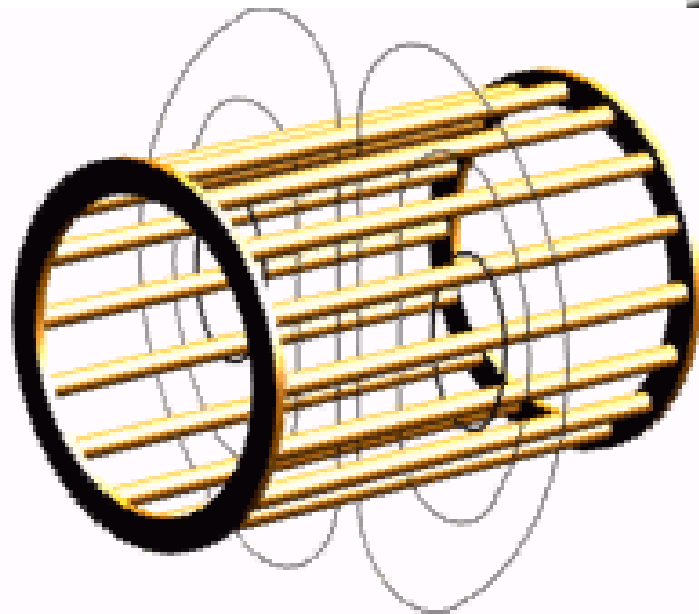
从交流电机的结构上来看，同步电机的定子铁心和定子绕组与异步电机的完全一样，而且它们的转子铁心也都由导磁材料构成。两者的区别就在于转子结构。





同步机的转子

在同步电机中，转子是主磁极，当外加的直流励磁电流流入转子绕组时，转子铁芯便表现出固定的极性，随转子一起旋转，相当于一块旋转的磁铁



异步机的转子绕组

在异步电机中转子绕组是一个自行闭合的绕组，当气隙磁场切割转子绕组时，便会在转子绕组中感应电势产生电流，转子铁芯便表现为表面旋转变化的磁极



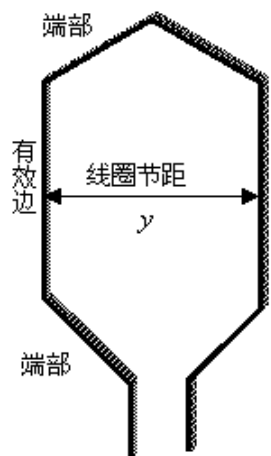


## • 交流绕组的基本概念

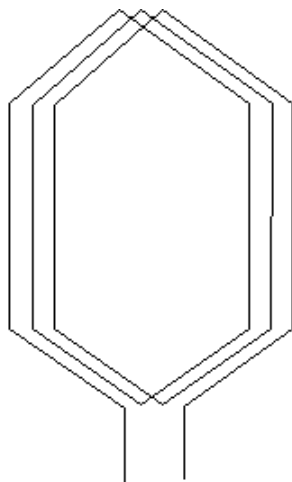
绕组：按一定规律排列和连接的线圈的总称

- ①要求**磁势和电势的波形为正弦波形**；
- ②要求磁势和电势三相对称，三相电压对称；
- ③电力系统都有**统一的标准频率**，我国规定工业标准频率为50Hz。

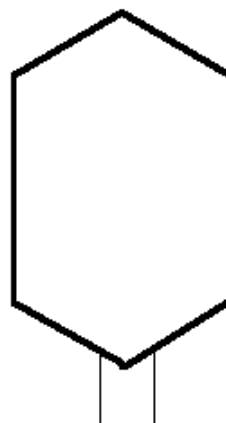
在一定的导体数下，获得较大的基波电势和基波磁势。



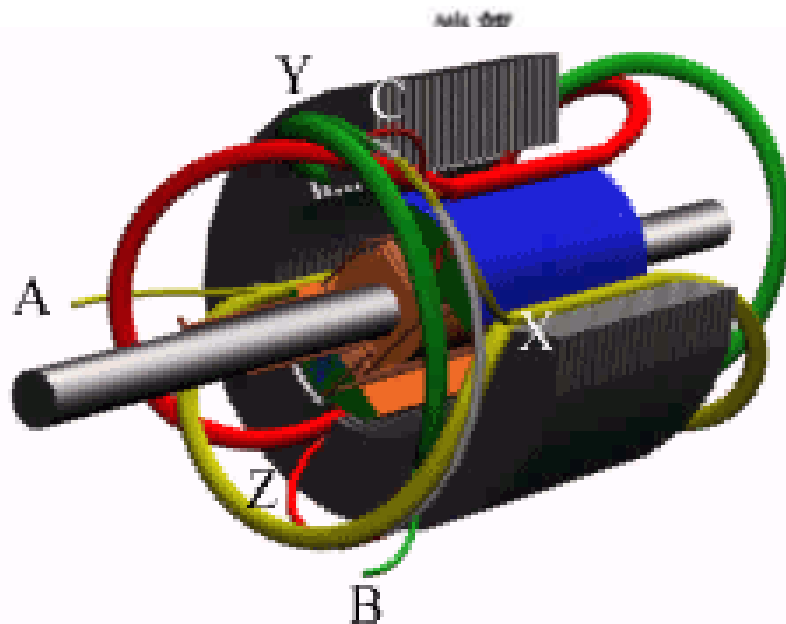
(a) 单匝线圈

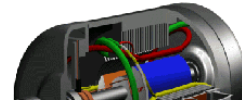


(b) 多匝线圈

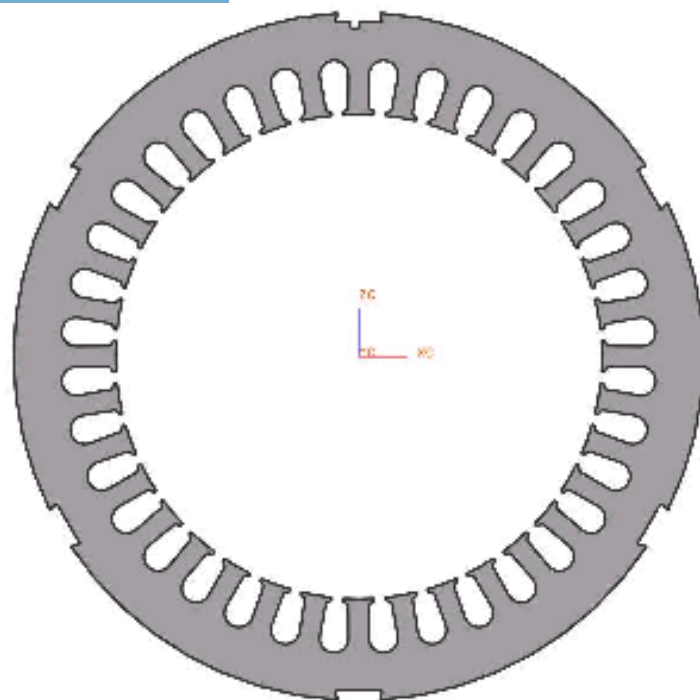
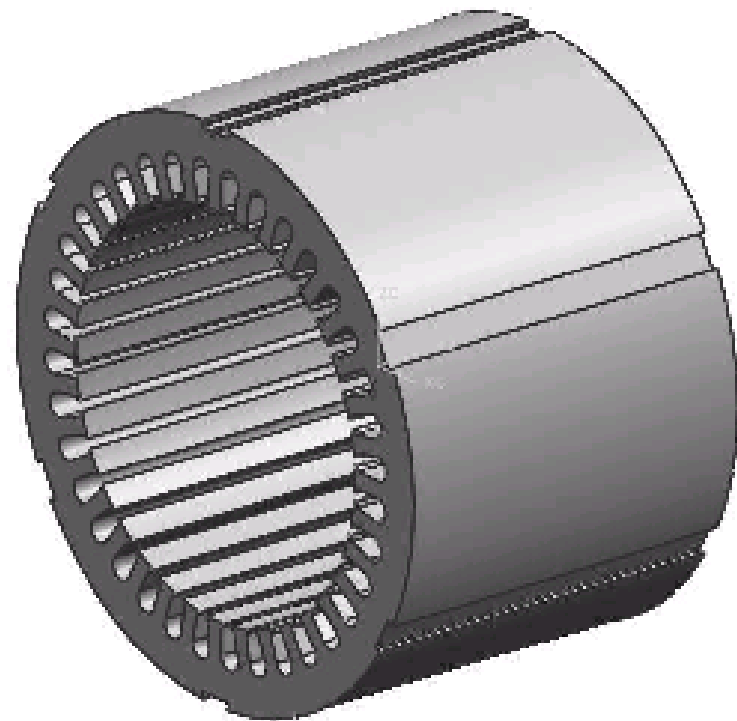


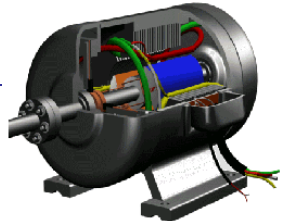
(c) 多匝线圈简图





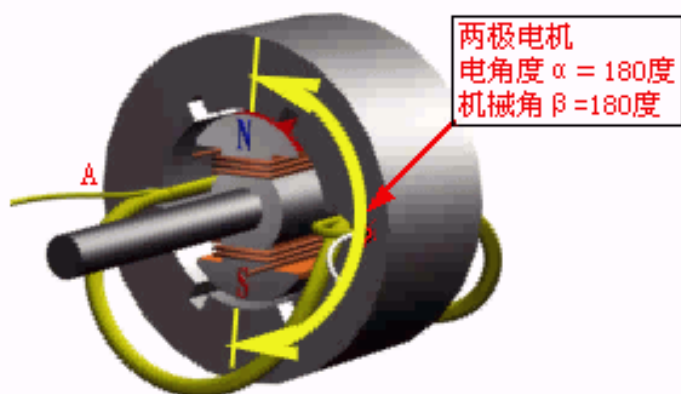
1 散嵌线图



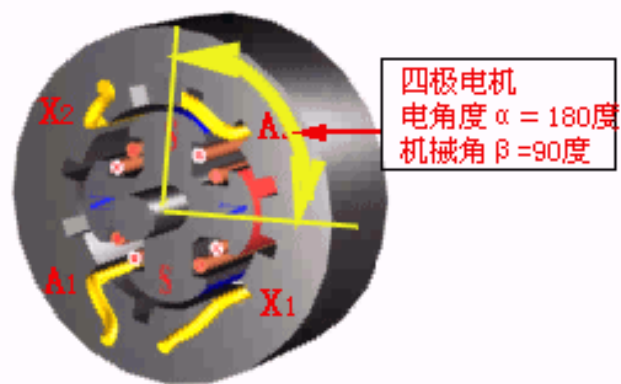
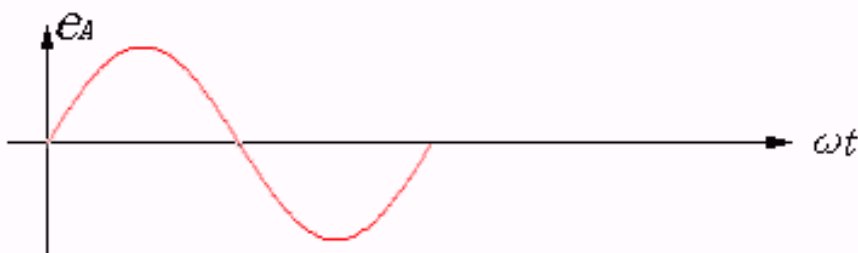


## • 电角度

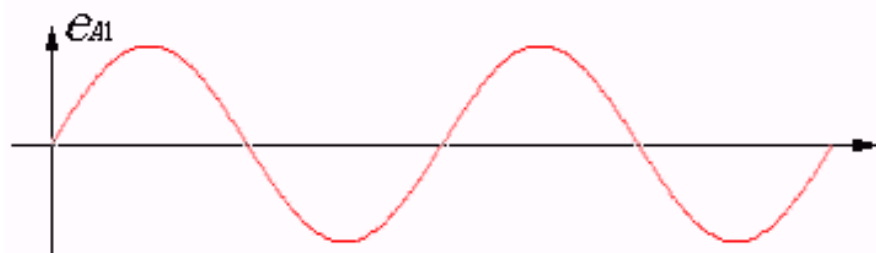
- 磁场每转过一对磁极，电势变化一个周期，称为（一个周期） $360^\circ$  电角度。在电机中一对磁极所对应的角度定义为 $360^\circ$  电角度。（几何上，把一圆周所对应的角度定义为 $360^\circ$  机械角度。）
- 磁极对数为 $p$   
圆周机械角度为 $360^\circ$  电角度为  $p \times 360^\circ$



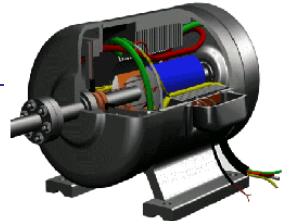
一对极同步电机模型图



两对极同步电机模型图





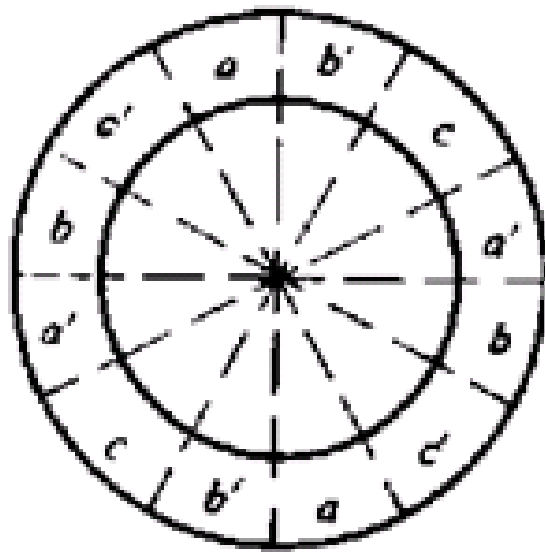
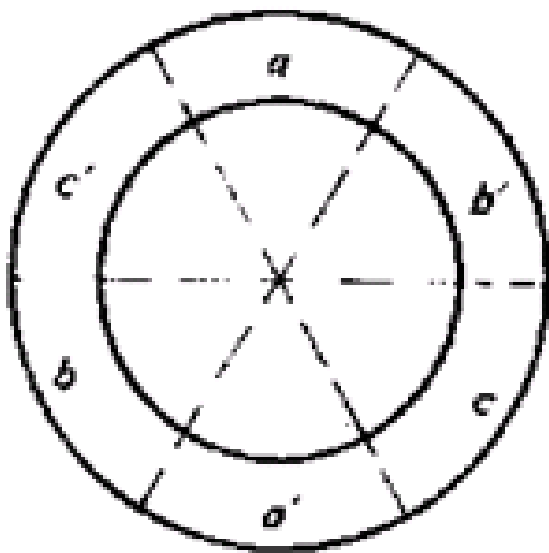


## • 相带

➤ 为了三相绕组对称，在每个极面下每相绕组应占有相等的范围——相带。

➤ 每个极对应于 $180^\circ$ 电角度，如电机有 $m$ 相，则每个相带占有 $(180/m)$ 电角度。三相电机 $m=3$ ，其相带为 $60^\circ$ ，按 $60^\circ$ 相带排列的绕组称为 $60^\circ$ 相带绕组。

把**每对极**所对应的定子槽等分为六个等分。依次称为 $a$ 、 $c'$ 、 $b$ 、 $a'$ 、 $c$ 、 $b'$ 相带，各相绕组放在各自的相带范围内





- 每极每相槽数 $q$

每个极面下每相占有的槽数。已知总槽数 $Z$ 、极对数 $p$ 和相数 $m$ 为，则

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

$q > 1$ ——分布绕组

整数槽绕组—— $q$ 为整数

分数槽绕组—— $q$ 为分数

- 槽距角 $\alpha$

相邻两槽之间的电角度

$$\alpha = \frac{p * 360}{Z}$$





## •极距 $\tau$

相邻两磁极对应位置两点之间的圆周距离

几何尺寸——每极所对应的定子内圆弧长

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

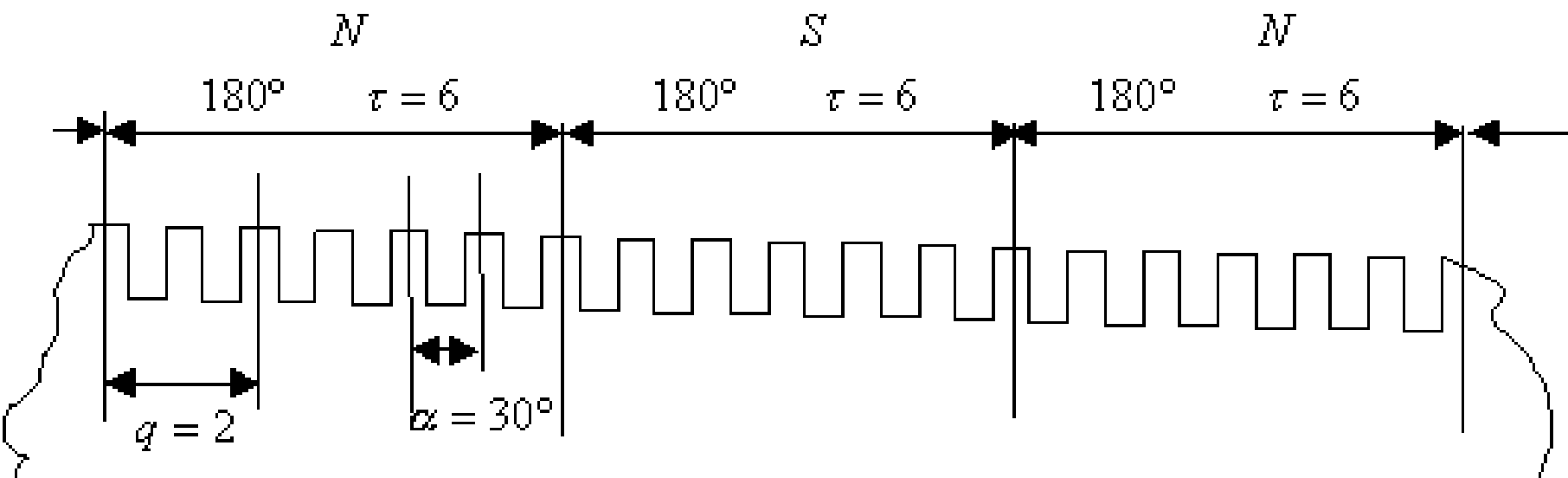
D为定子内圆直径。

槽数表示极距：

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

即基波磁场每极所对应的槽数





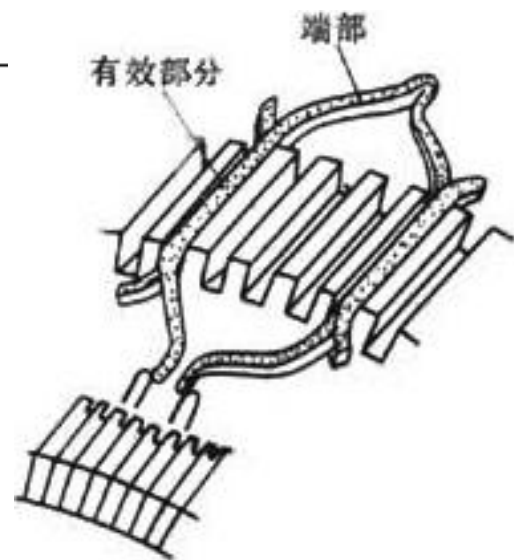
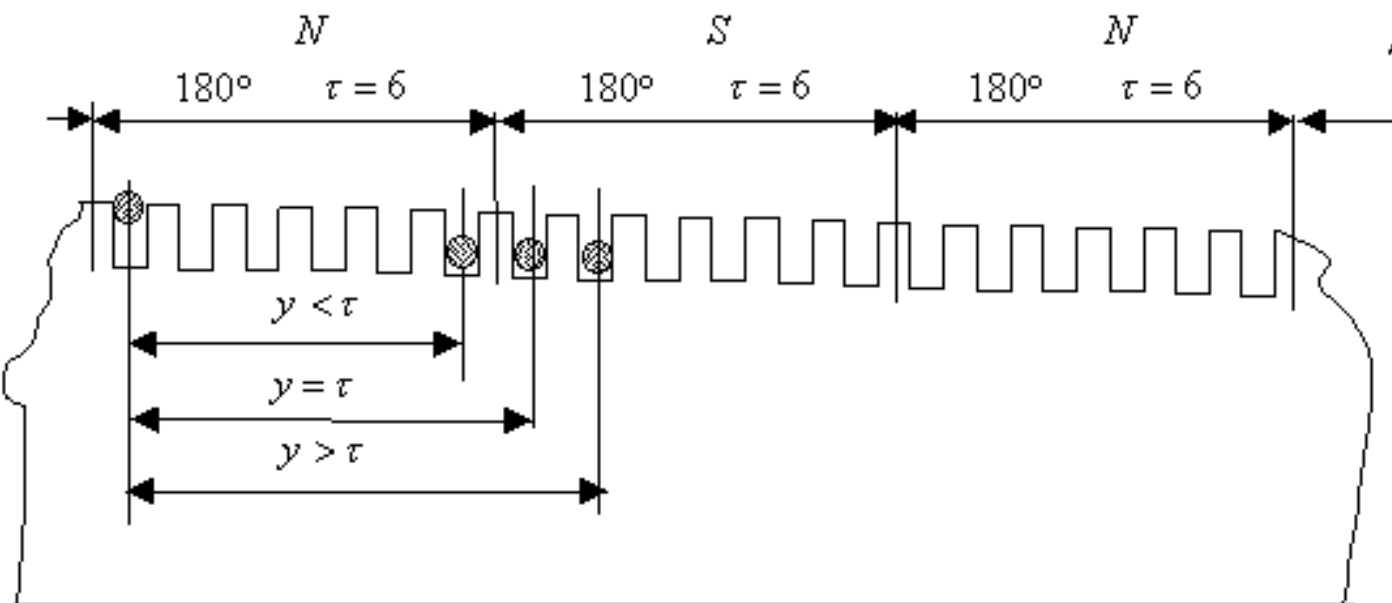
图：极距，每极每相槽数，槽距角的概念





## • 节距 $y$ (跨距)

表示元件的宽度。元件放在槽内，其宽度可用元件两边所跨越的槽数表示。



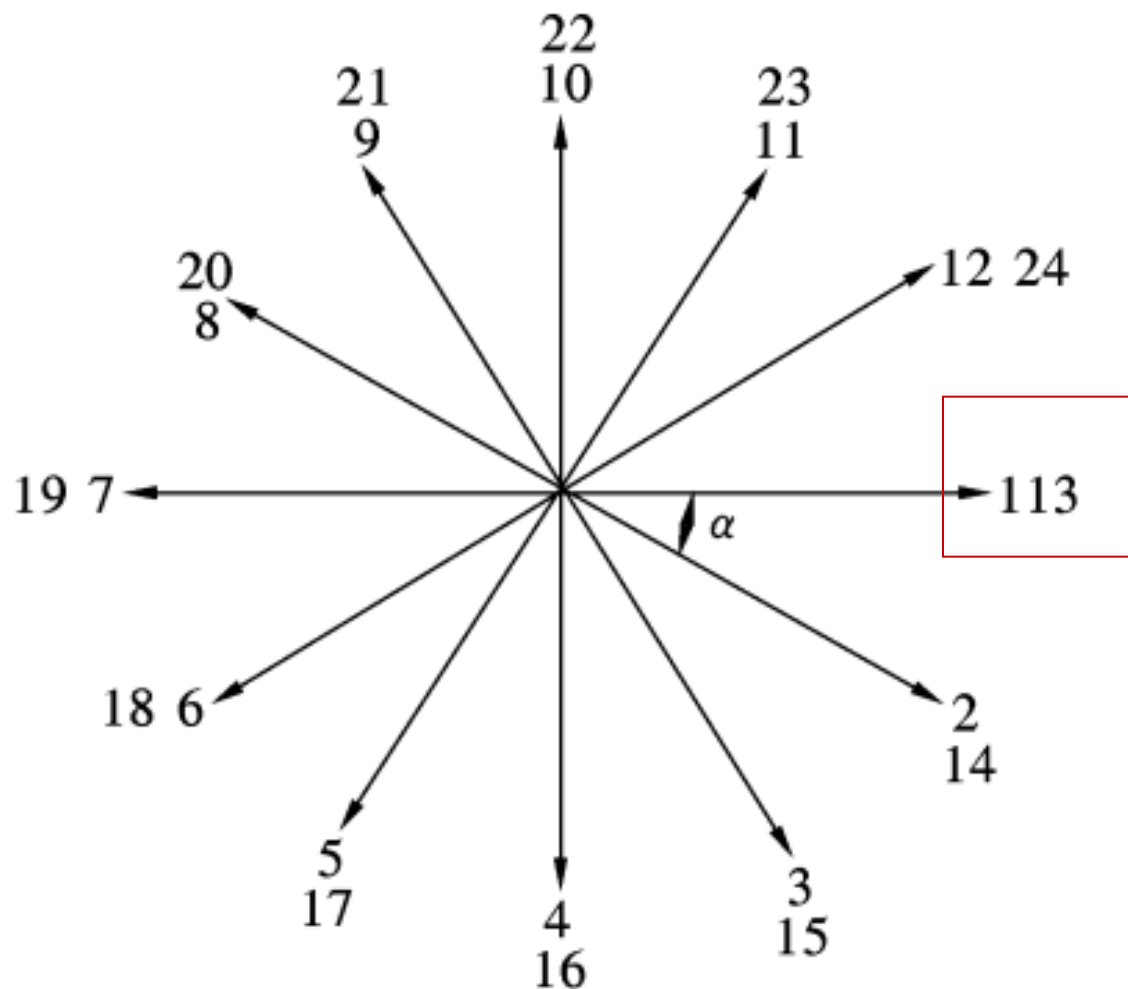
图：整距，短距，长距线圈的概念





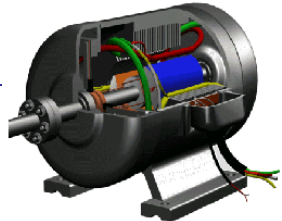
## 分析工具：槽导体电势星形图

把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电势分别用矢量表示，构成一幅射星形图



相距360度电角度，导体电势时间上同相位





## 三相单层绕组

- 单层——每槽中只放置一层元件边，元件数等于槽数的一半，无需层间绝缘，结构和嵌线较简单
- 单层绕组只适用于10kW以下的小型异步电动机，其极对数通常是 $p=1, 2, 3, 4$
- 单层绕组通常有链式、交叉式和同心式等三种不同排列方式

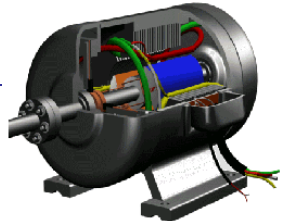
## 单层绕组的构造方法和步骤

### ➤分极分相：

将总槽数按给定的极数均匀分开（N, S极相邻分布）并标记假设的感应电势方向。

将每个极的槽数按三相均匀分开。三相在空间错开120电角度。





## ➤ 连线圈和线圈组：

将一对极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈  
(共有 $q$ 个线圈，为什么？)

将一对极域内属于同一相的 $q$ 个线圈连成一个线圈组  
(共有多少个线圈组？)

以上连接应符合电势相加原则

## ➤ 连相绕组：

将属于同一相的 $p$ 个线圈组连成一相绕组，并标记首尾端。

串联与并联，电势相加原则。

## ➤ 连三相绕组：

将三个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组

$\Delta$ 接法或者Y接法。



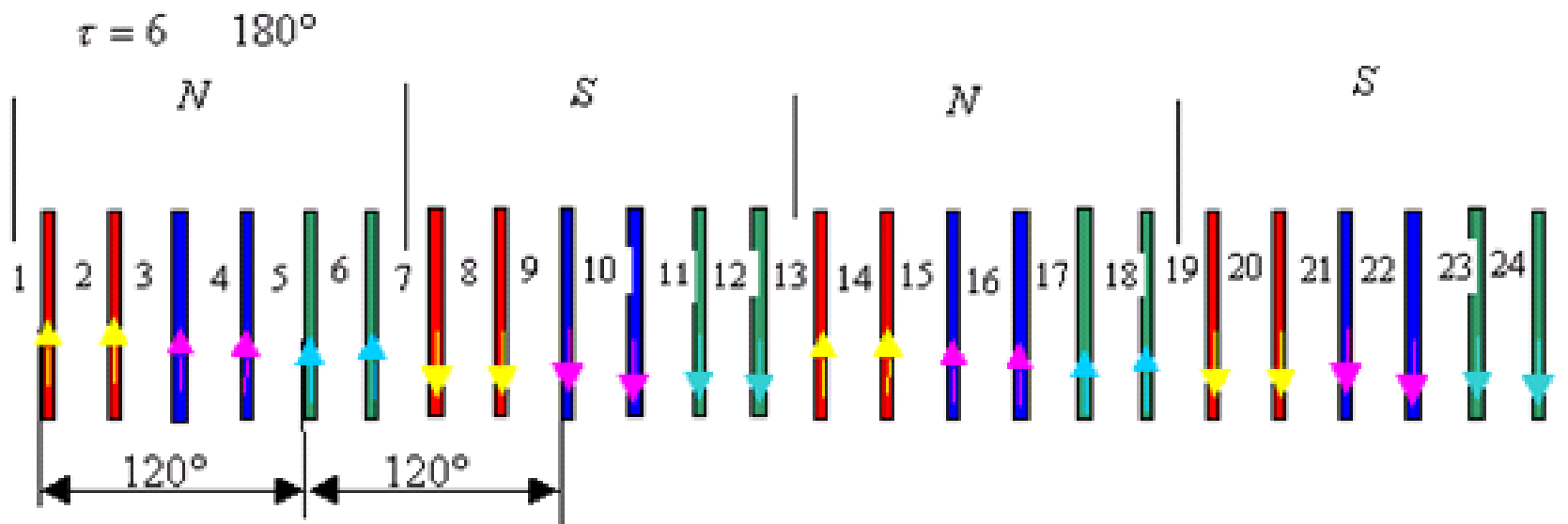


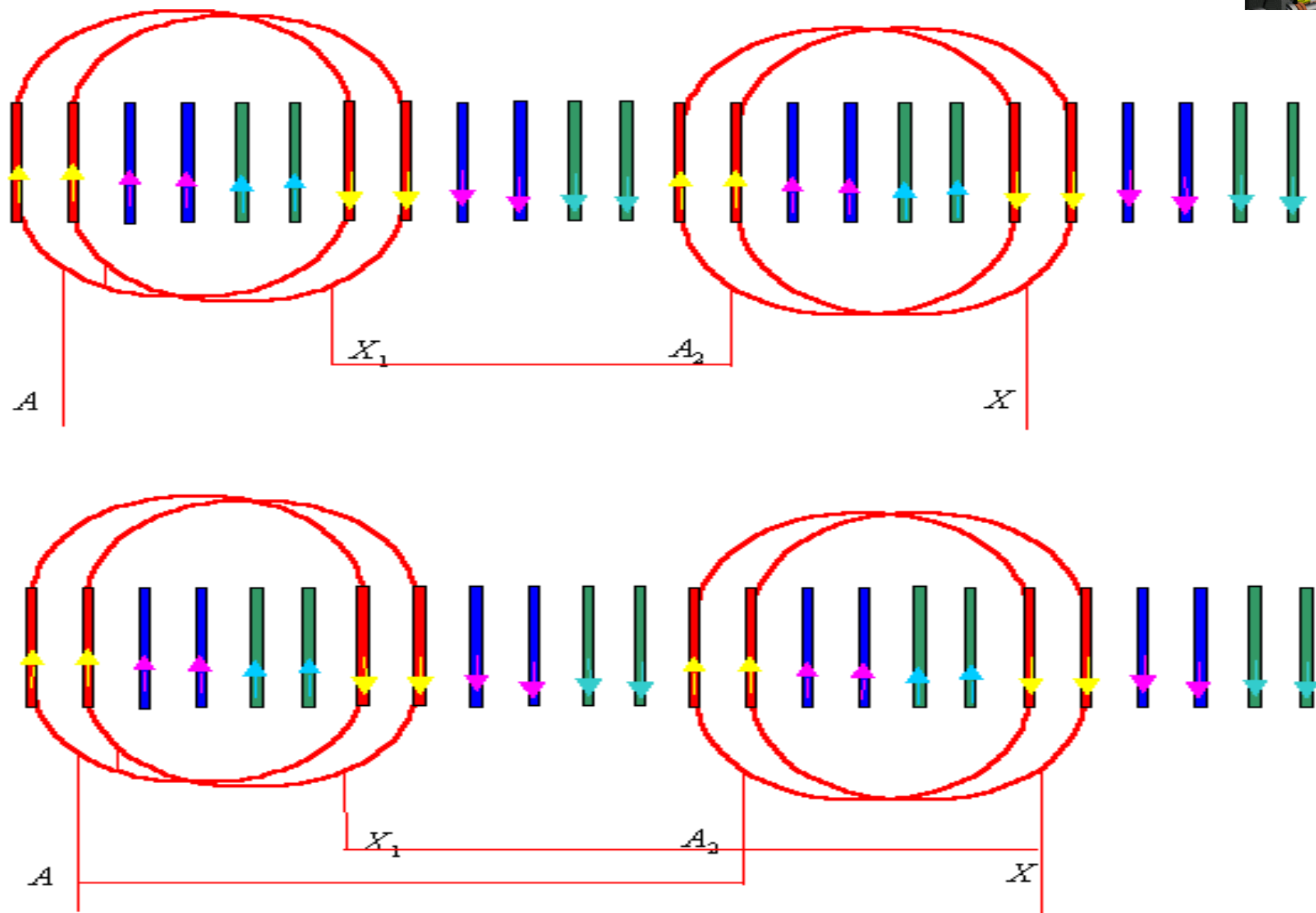
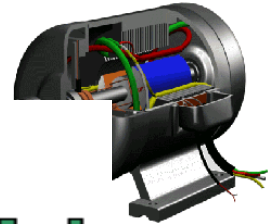


例如：相数 $m=3$ ，极数 $2p=4$ ，槽数 $Z=24$

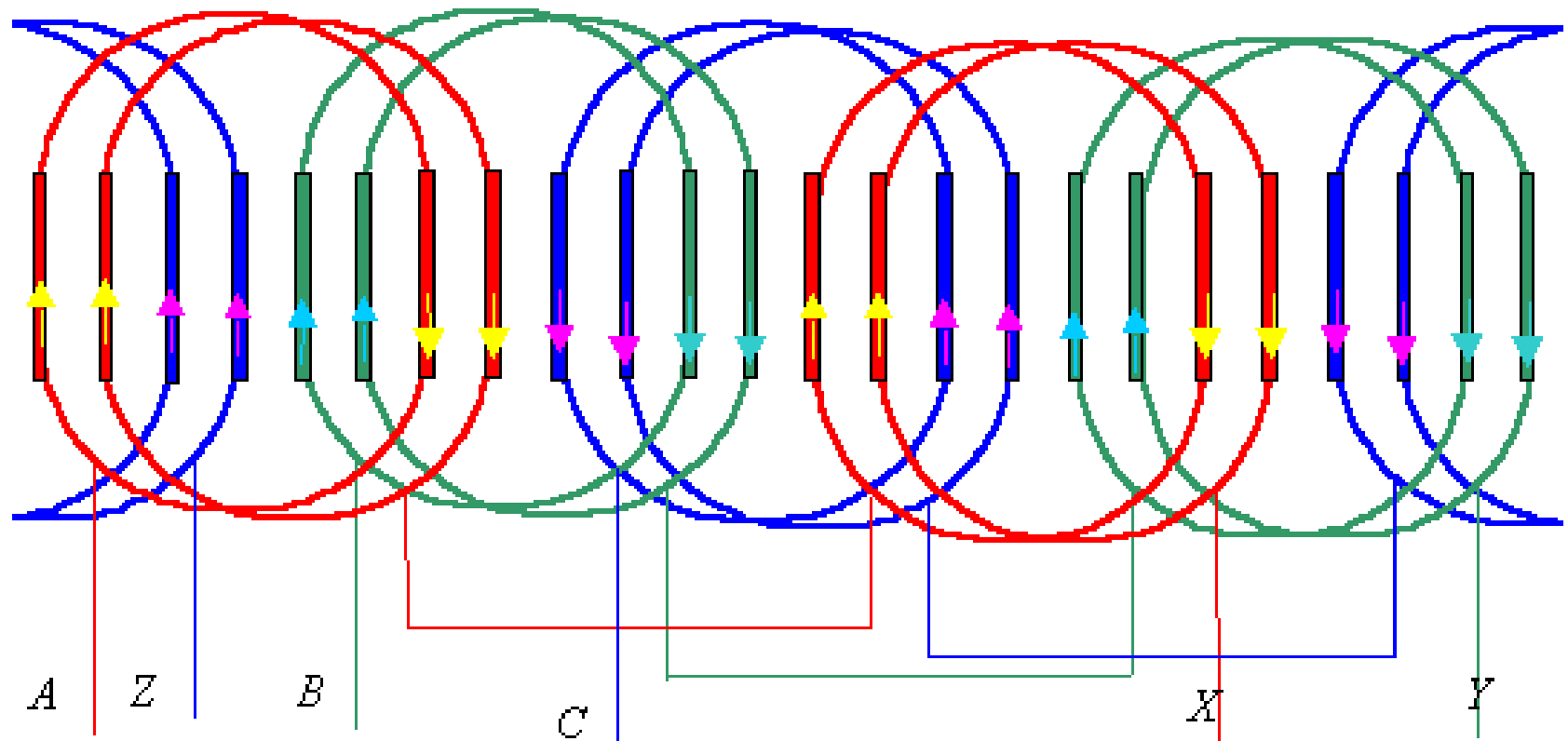
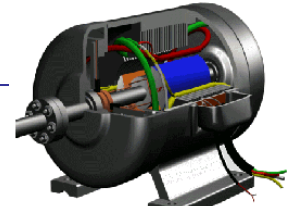
每极每相槽数 $q=2$ ，槽距角 $\alpha=30^\circ$ ，极距 $\tau=Z/2p=24/4=6$

极 对	相 带					
	a	c'	b	a'	c	b'
第一对极	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10	11, 12
第二对极	13, 14	15, 16	17, 18	19, 20	21, 22	23, 24





图：单层绕组排列步骤 3，连相绕组，串联与并联



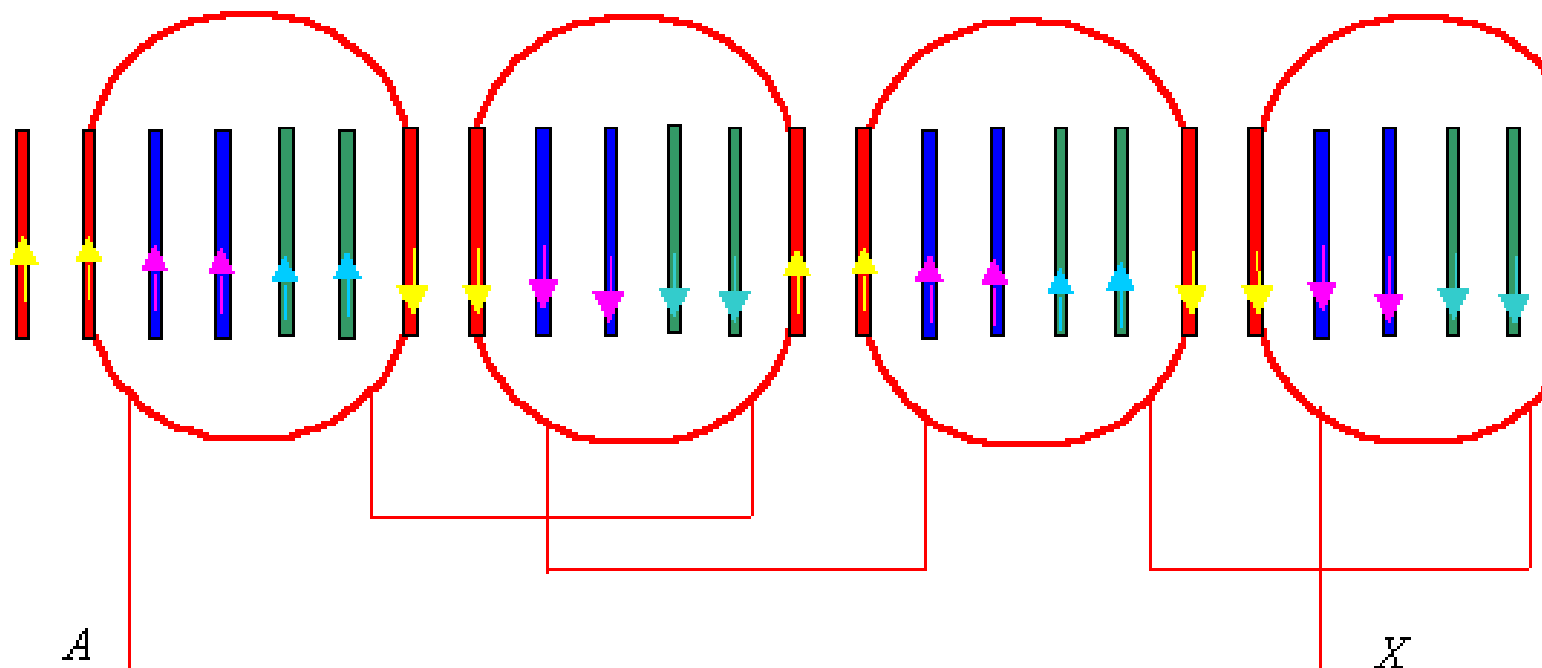
图：单层绕组排列步骤 4，连成三相绕组





## 一、链式绕组

链式绕组适用于 $q=2$ ,  $p>1$ 的小型异步电机。例如 $m=3$ ,  $p=2$ ,  $Z=24$ ,  $q=2$ ,  $a=30^\circ$



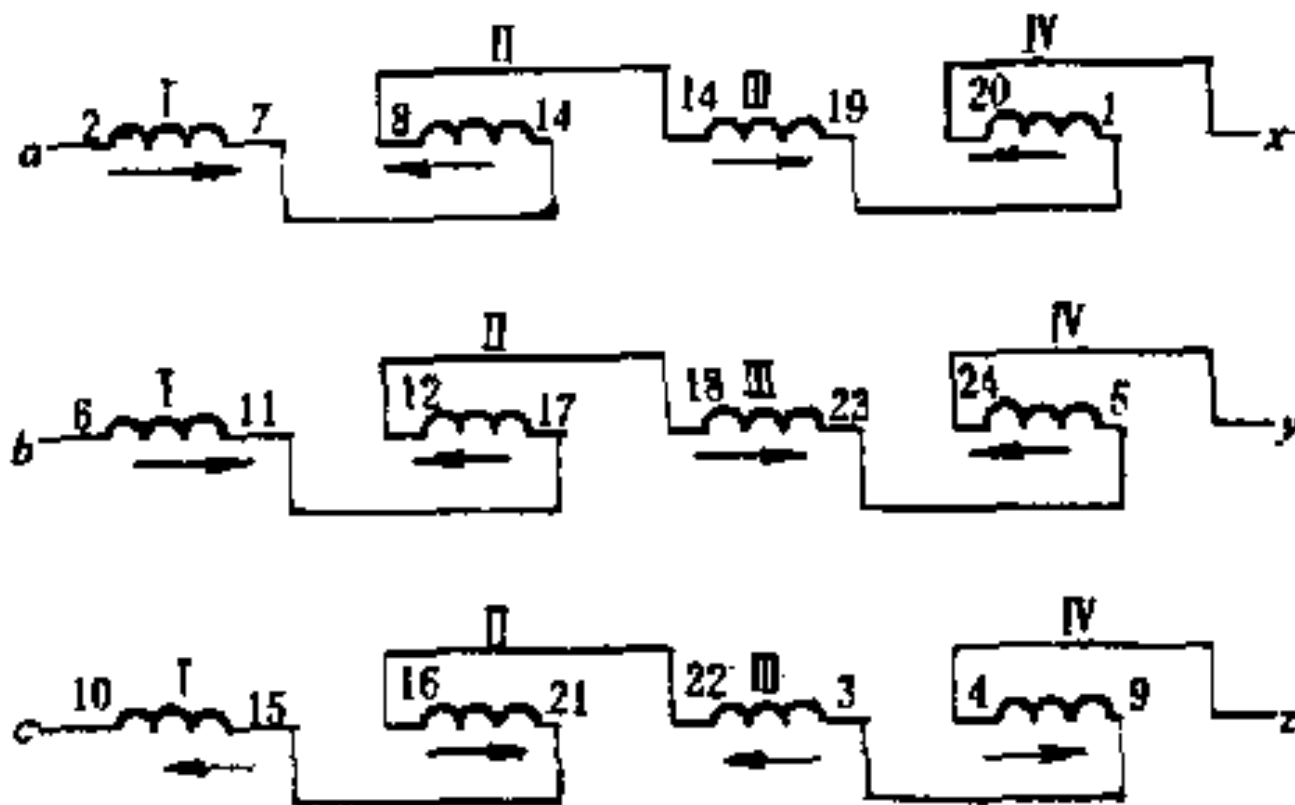
$$y = 5 < \tau = 6$$

图：单层链式绕组





- 链式绕组的每个元件都是短距。从相电势和磁势角度看——具有整距性质



图

链式绕组各元件连接顺序



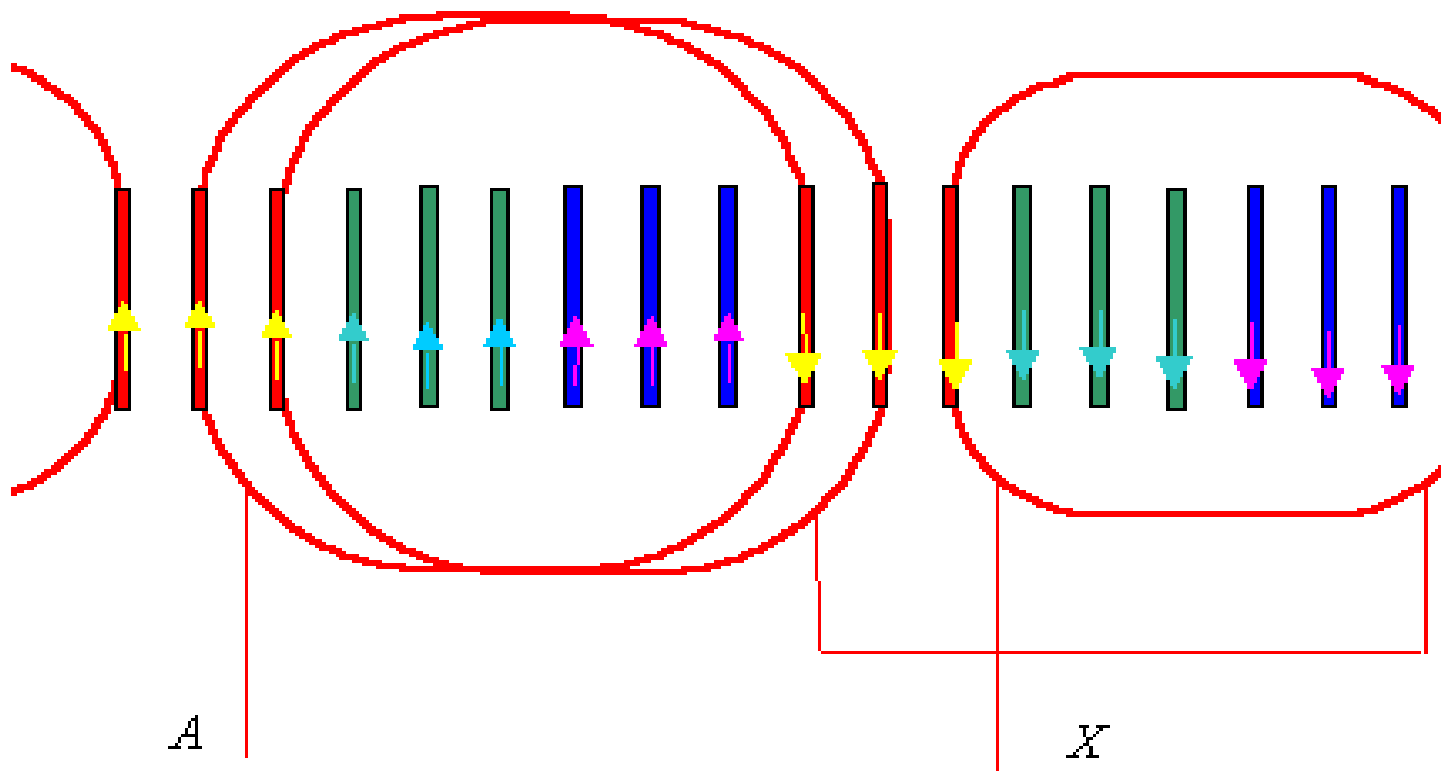


## 二、交叉式绕组

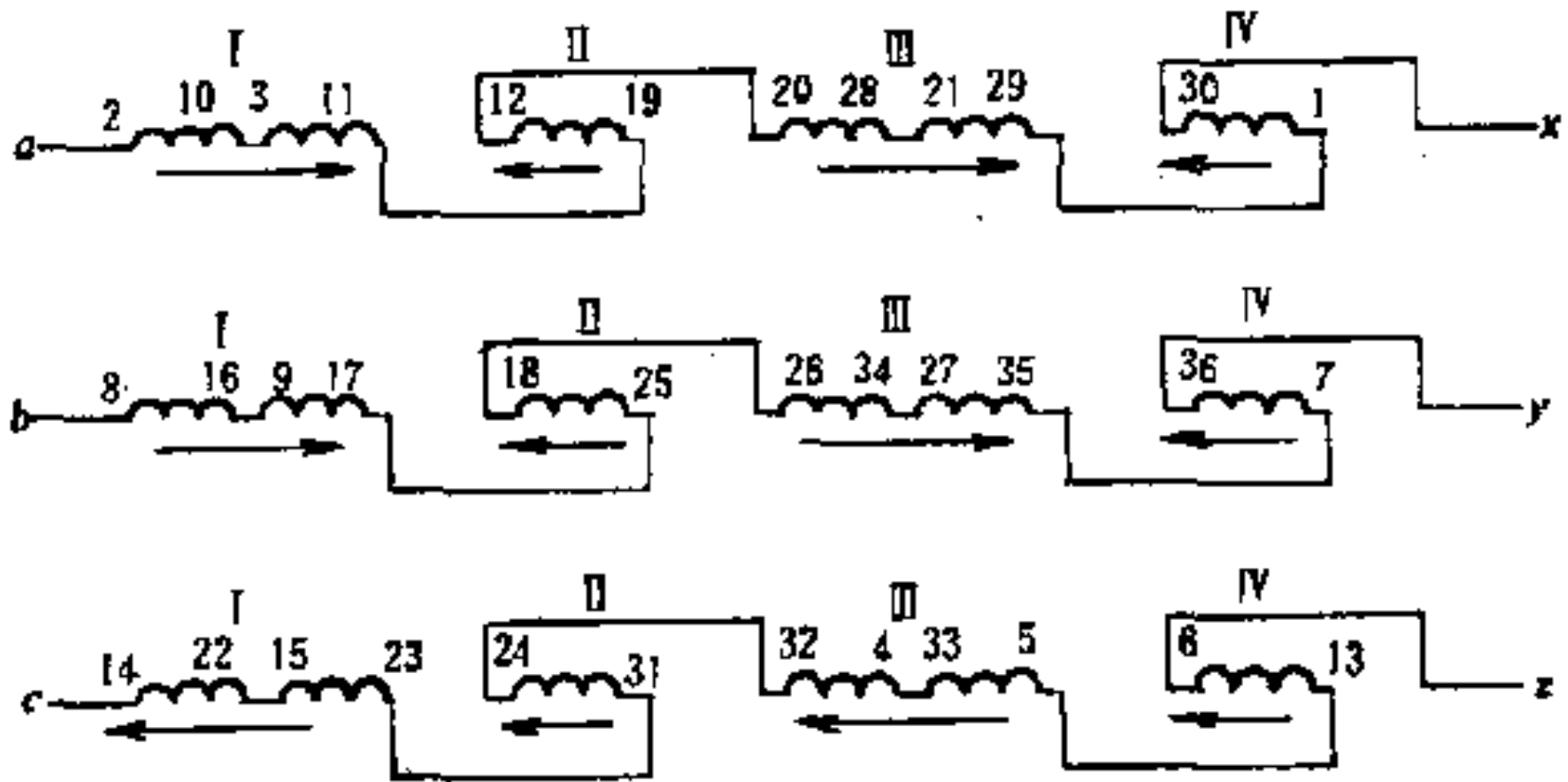
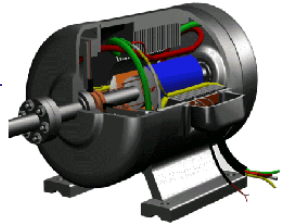
交叉式绕组适用于 $q=3$ 的小型异步电机

例如： $m=3$ ， $p=2$ ， $q=3$ 。

定子槽数 $Z=2mpq=2*3*2*3=36$



图：单层交叉链式绕组



图

交叉绕组各元件连接次序





### 三、同心式绕组

对于 $p=1$ 的小型三相异步电动机和单相异步电动机，每极每相槽数 $q$ 较大，采用同心式绕组嵌线

例如： $m=3$ ， $p=1$ ， $q=4$ 。则定子槽数 $Z=2mpq=2*3*1*4=24$ ，槽距角 $\alpha=15^\circ$

极 对	相 带					
	a	c'	b	a'	c	b'
第一对极	23,24,1,2	3,4,5,6	7,8,9,10	11,12,13,14	15,16,17,18	19,20,21,22





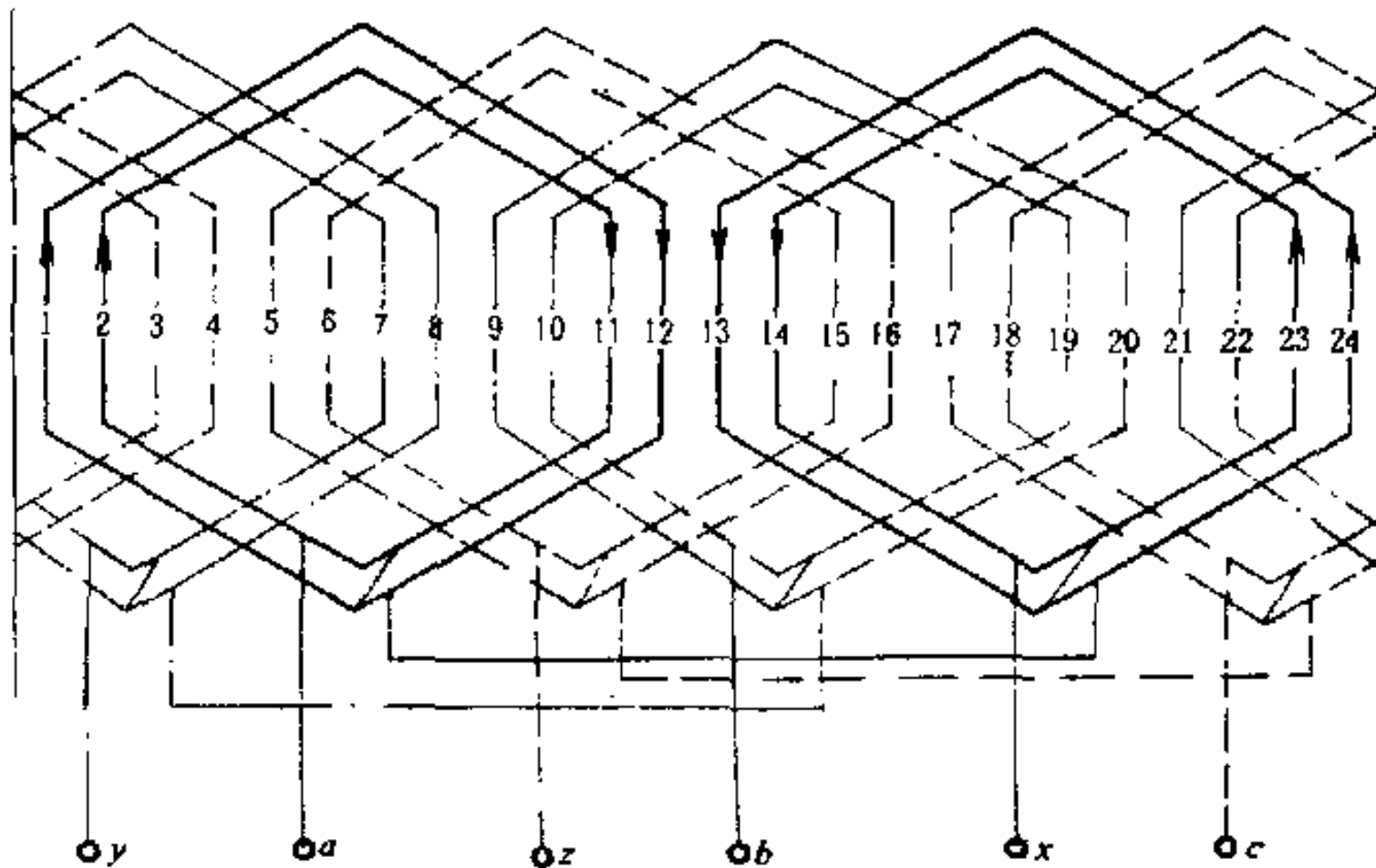
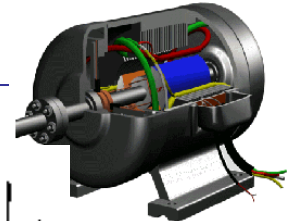


图 同心式绕组展开图 ( $p=1, q=4$ )



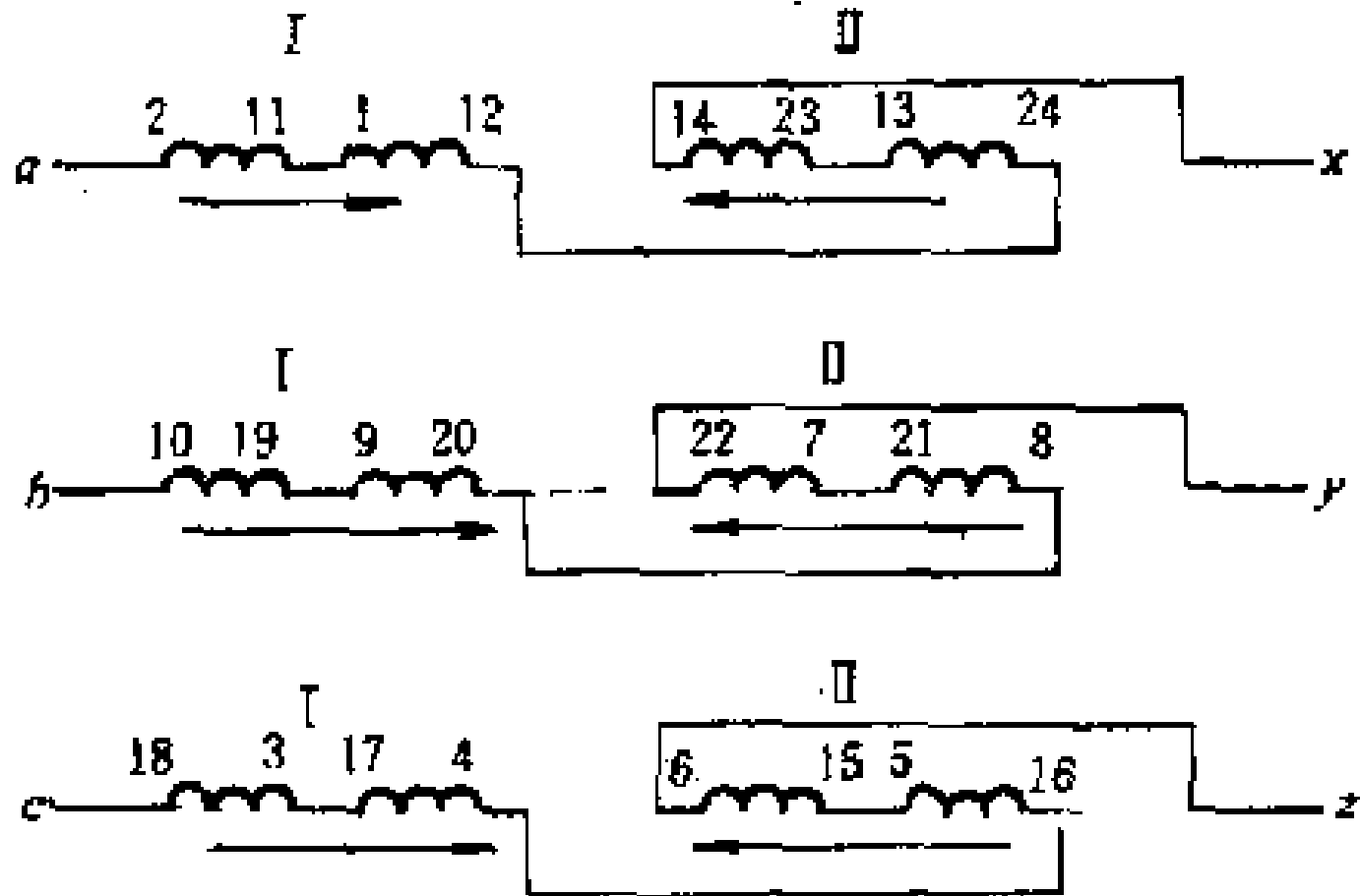
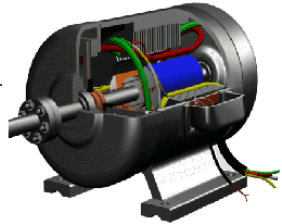
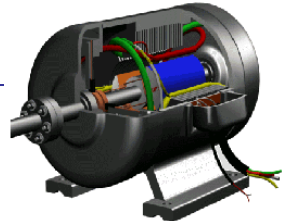


图 同心式绕组各元件连接顺序



## 小结：三相单层绕组

- 在外形上有多种绕组型式：元件节距可以整距、短矩或长短，合理选用绕组型式，可以节省铜线，简化工艺。
- **分析相电势**：采用槽电势星形图。绕组型式不同只不过是元件构成方式不同、导体连接先后次序不同，而构成绕组的导体所占的槽号是相同的，都在属两个相差 $180^\circ$ 电角度的相带内，三相单层绕组的节距因数均为1，具有整距绕组性质
- 优点：绕组因数中只有分布因数，基波绕组因数较高，无层间绝缘，槽利用率高
- 缺点：对削弱高次谐波不利，无法改善电势波形和磁势波形，漏电抗较大
- 使用：一般用于10kW以下小功率电机。（功率较大或对波形要求较高的电机，通常采用双层绕组。）





## 三相双层绕组

- 双层——每槽中有两个元件边，分为上下两层放置。靠近槽口的为上层，靠近槽底部为下层。每个元件均有一个边放在上层，一个边放在另一槽的下层，相隔距离取决于节距。
- 元件的总数等于槽数，每相元件数即为槽数的三分之一。

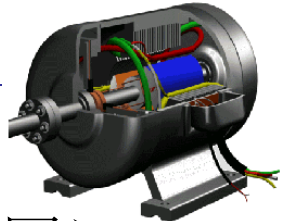
### 构造方法和步骤（举例： $Z_1=24$ , $2p=4$ , 整距, $m=3$ ）

#### • 分极分相：

将总槽数按给定的极数均匀分开（N, S极相邻分布）并标记假设的感应电势方向；

将每个极域的槽数按三相均匀分开。三相在空间错开120电角度。





## •连线圈和线圈组：

根据给定的线圈节距连线圈（上层边与下层边合一个线圈）  
以上层边所在槽号标记线圈编号。

将同一极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈  
（共有 $q$ 个线圈，为什么？）

将同一极域内属于同一相的 $q$ 个线圈连成一个线圈组  
（共有多少个线圈组？）

以上连接应符合电势相加原则

## •连相绕组：

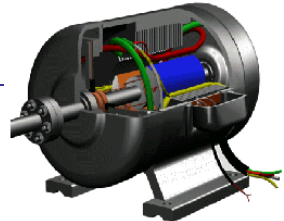
将属于同一相的 $2p$ 个线圈组连成一相绕组，并标记首尾端。

串联与并联，电势相加原则。按照同样的方法构造其他两相。

## •连三相绕组

将三个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组  
 $\Delta$ 接法或者Y接法





例：设相数 $m=3$ ，极数 $2p=4$ ，槽数 $Z=24$ ，则每极每相槽数 $q=2$ ，槽距角 $\alpha=30^\circ$

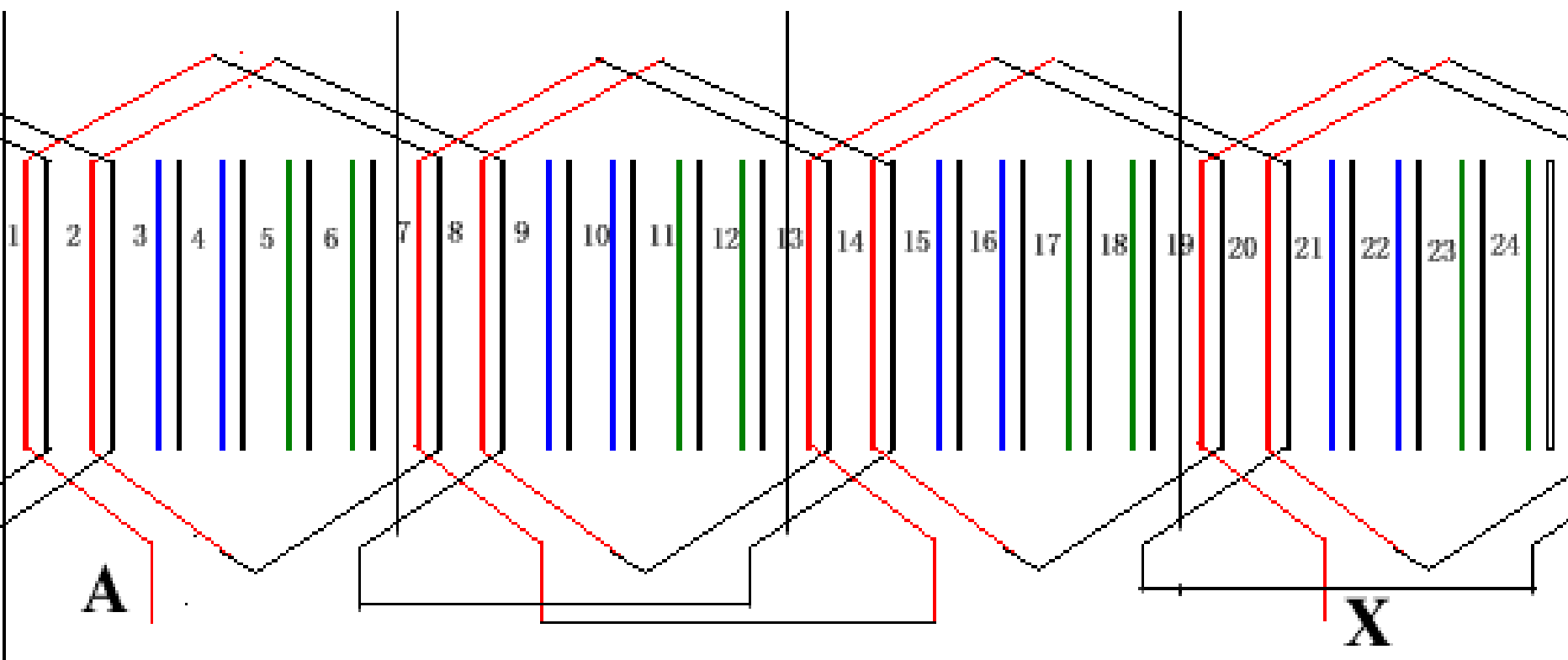
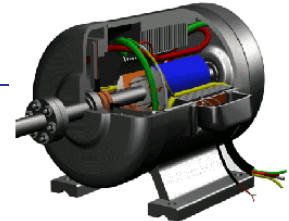
## 步骤：

- 绘槽电势星形图
- 分相——使各相电势最大，且三相电势对称
- 绘绕组元件平面展开图

首先画出等距离的24根平行线段以表示**槽号**——表示各元件的上层边。在实线近旁画出虚线以表示下层元件边。把各槽按顺序编号，取槽号作为上层边的代号，取槽号加注上标'作为下层边代号。



# 交流绕组



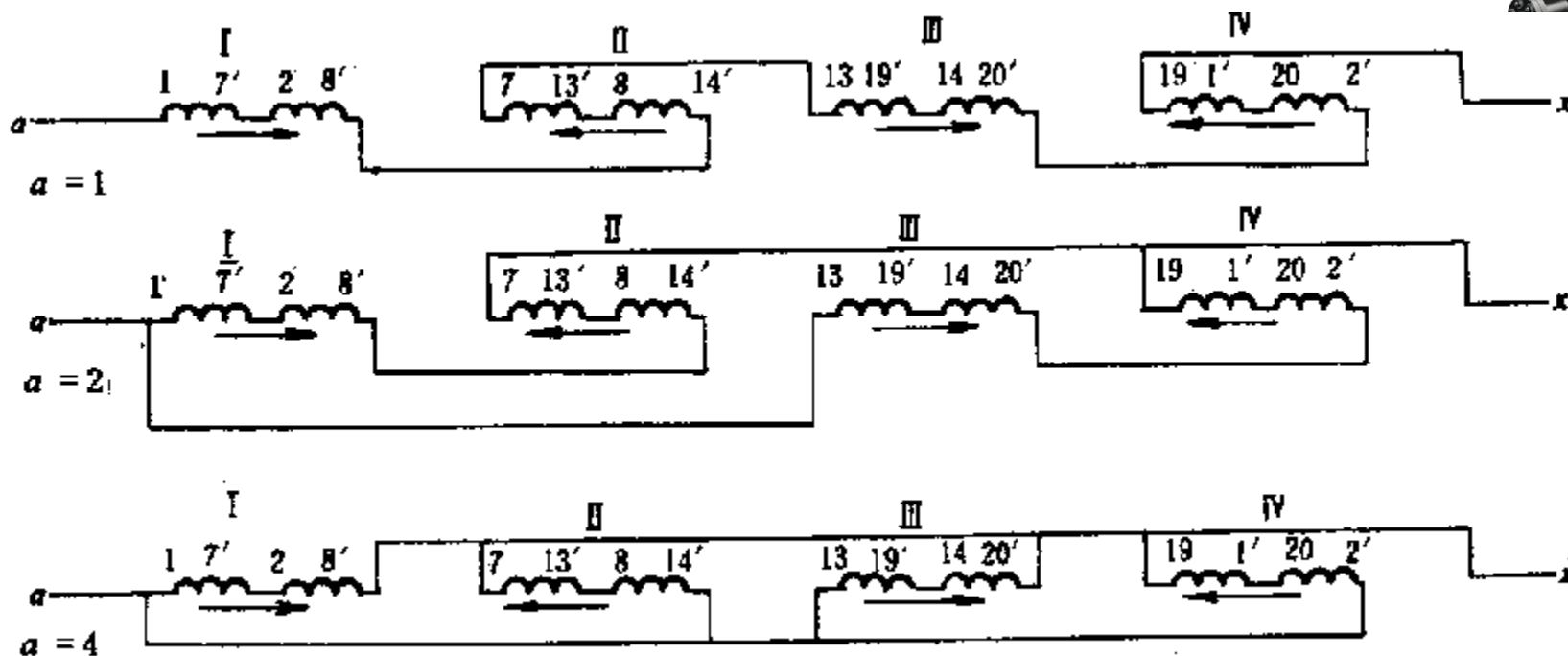
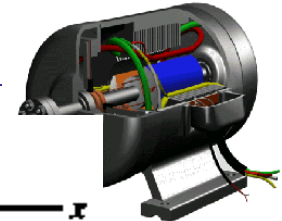


图 说明并联支路(以  $a$  相为例)

- 当磁场切割绕组时，该四个元件组的电势大小相等，I、III组电势时间上同相，II、IV组电势与I、III组电势反相。
- 各元件组可以串联、并联、或一半串联后再并联。相绕组可以有不同连接方式，当通以电流形成4极磁场。

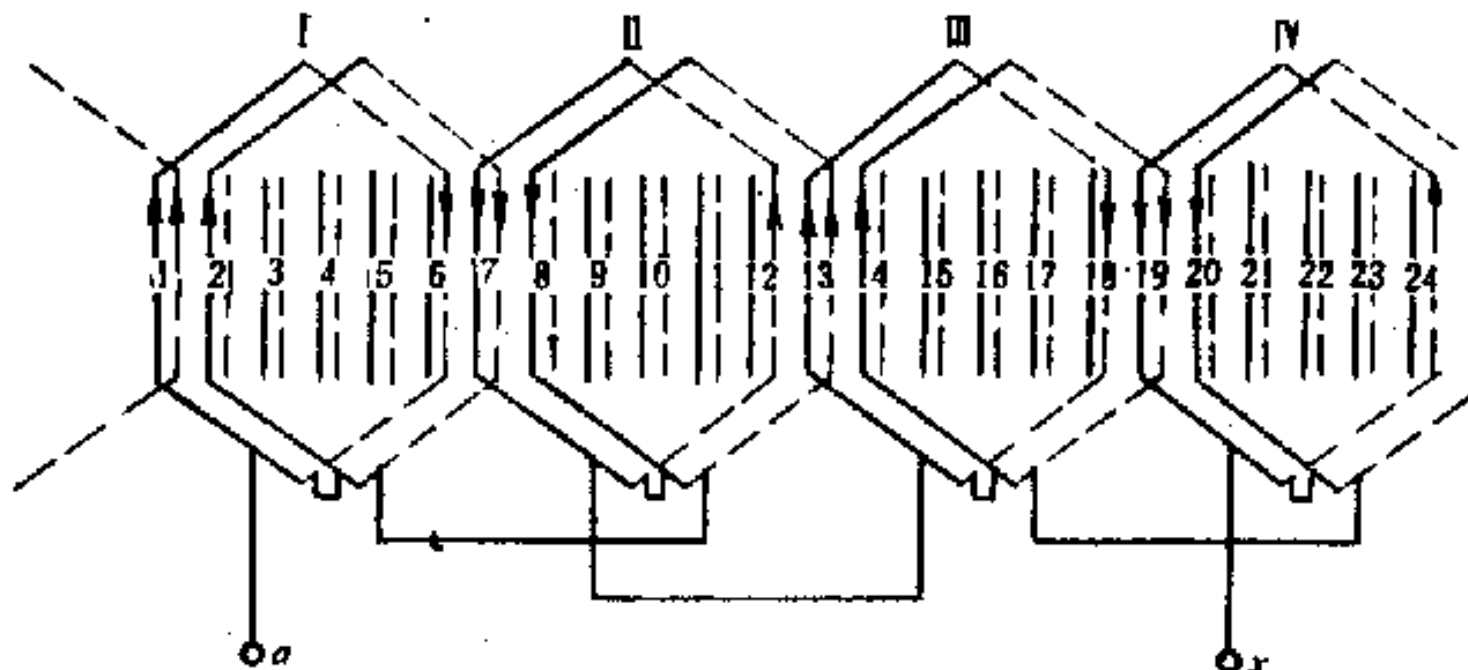






## • 短距绕组

取  $y=5$ ，每个元件跨5个槽，a相的4个元件组，分别是1-6'-2-7'，7-12'-8-13'，13-18'-14-19'，19-24'-20-1'

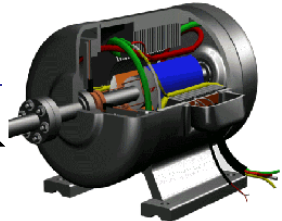


(b) 短距绕组  $y = \frac{5}{6} \tau = 5$

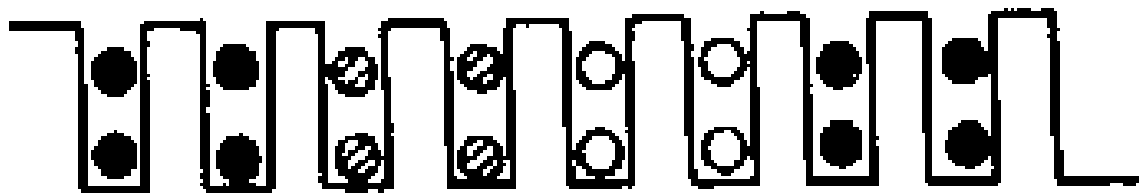
图

三相双层绕组 ( $p=2, q=2$ )

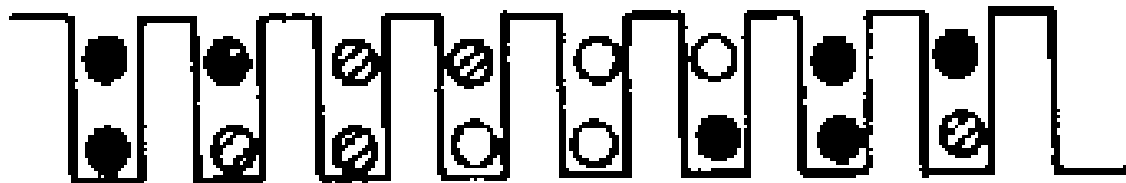




- 短距时，在某些槽中，其上层元件边与下层元件边可能不属一相，在这些槽中，上层与下层之间有较大电位差，应加强层间绝缘。
- 短距时，同一相的上、下层导体错开了一个距离，用短距角  $\beta$  表示，表示一个元件的上层导体电势和下层导体电势的相位差是  $180^\circ - \beta$  电角度，合成电势时应计及节距因数  $k_p$ 。

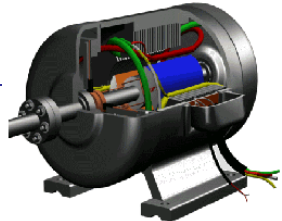


整距绕组  $y = \tau = 6t$



短距绕组  $y = \frac{5}{6}\tau = 5$





## 元件的电势

电势决定于磁场的大小与分布以及磁场与元件间的相对运动

设气隙磁场按正弦规律分布，则每极磁通

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} B_m l \tau$$

气隙磁场每转过一对磁极，线圈中的电势便经历一个周期。电势的频率用每秒转过的磁极对数表示。

极对数 $p$ ，转速 $n$  (r/min)，则频率

$$f = \frac{pn}{60}$$



# 绕组感应电动势

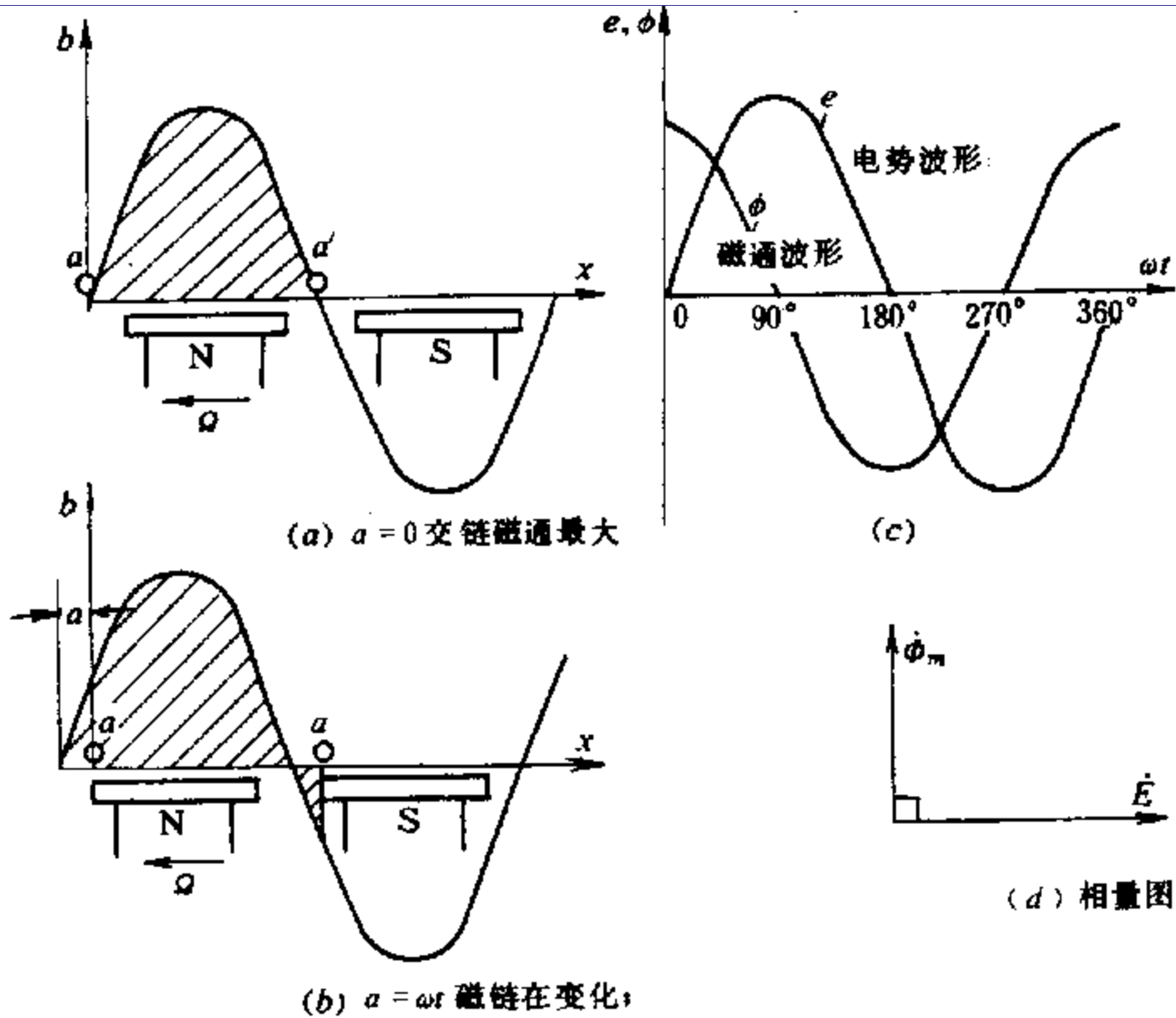
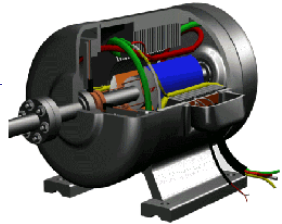


图 线圈中磁链变化的感应电势





元件中的感应电势  $e = -N d\Phi / dt$

- 设元件匝数为 $N_c$ ，感应电势的瞬时值为

$$e_c = -N_c \frac{d\phi}{dt} = \omega N_c \phi_m \sin \omega t$$

- 有效值

$$E_c = \frac{\omega N_c \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_c \phi_m$$





元件中的感应电势  $e=Blv$

- 设原点在转子上 $B=0$ 处，

即 $t=0$ 时， $B=0$

- 分析导体 $a$

$t=0$ 时， $B_a=0$ ， $e_a=B_a lv$

经过时间 $t$ ，转动了 $\omega t$ ， $B_a=B_m \sin \omega t$ ，

$$e_a=B_a lv= B_m lv \sin \omega t$$

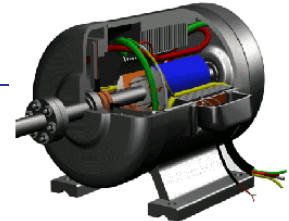
$$v = 2p\tau \frac{n}{60}$$

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} B_m l \tau$$

$$f = \frac{pn}{60}$$

有效值 
$$E_a = \frac{B_m lv}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} B_m l \tau \frac{pn}{60} = 2.22 f \phi_m$$





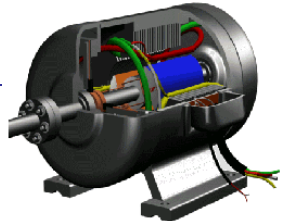
- 整距线圈

导体a'与导体a相距一个极距，即 $180^\circ$  电角度，

元件电势为  $e_{a'} = B_m l v \sin(\omega t - 180^\circ)$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{aa'(y=\tau)} &= \dot{E}_a - \dot{E}_{a'} = [2.22 f \phi_m] \angle 0^\circ - [2.22 f \phi_m] \angle -180^\circ \\ &= [4.44 f \phi_m] \angle 0^\circ\end{aligned}$$



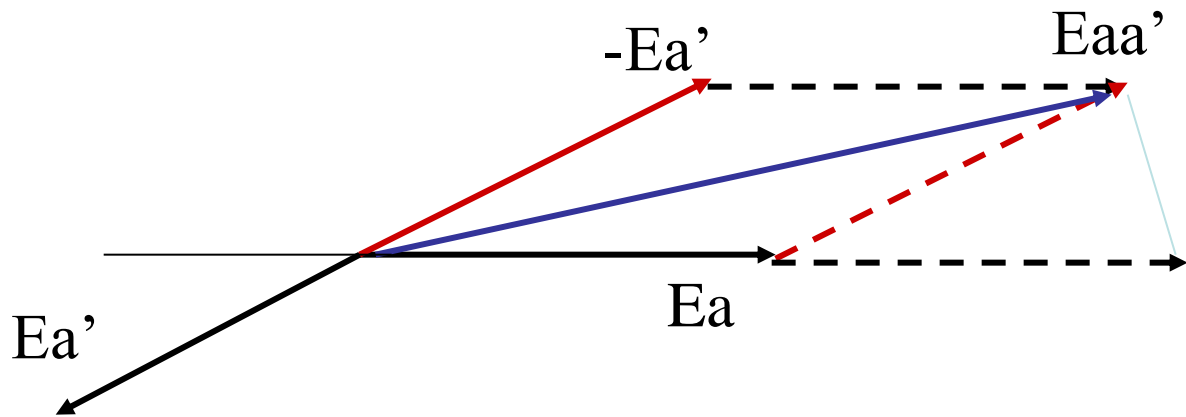


## • 短距线圈

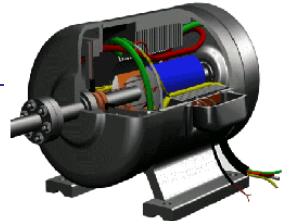
导体a'与导体a相距非一个极距（差一短距角 $\beta$ ）

元件电势为

$$\begin{aligned}\dot{E}_{aa'(y<\tau)} &= \dot{E}_a - \dot{E}_{a'} = [2.22 f \phi_m] \angle 0^\circ - [2.22 f \phi_m] \angle -(180^\circ - \beta) \\ &= [4.44 f \phi_m \cos \frac{\beta}{2}] \angle \frac{\beta}{2}\end{aligned}$$







短距元件的电势小于整距元件的电势  
 设短距角为 $\beta$ 电角度

节距因数  $k_p = \frac{E_{aa'(y<\tau)}}{E_{aa'(y=\tau)}} = \frac{4.44 f \phi_m \cos \frac{\beta}{2}}{4.44 f \phi_m} = \cos \frac{\beta}{2}$

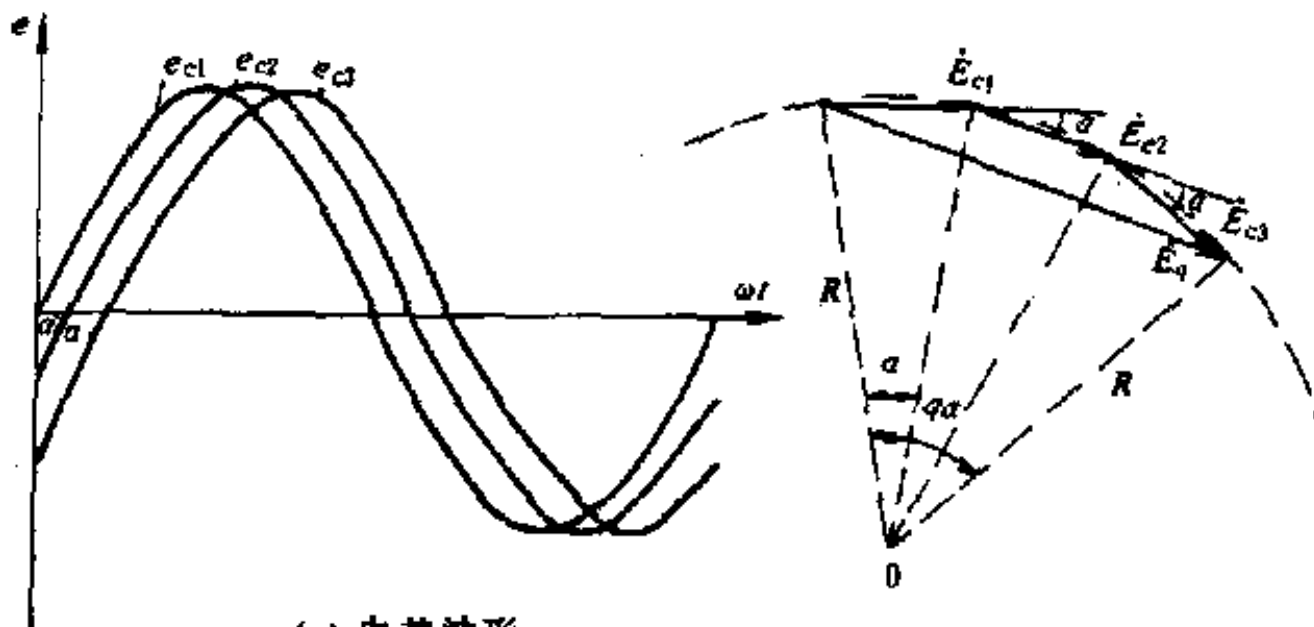
$$E_c = N_c E_{aa'(y<\tau)} = 4.44 f N_c k_p \phi_m$$





## 元件组电势

- 电机采用分布绕组，每元件组有 $q$ 个元件，元件组电势即为 $q$ 个元件的电势之和。
- 通常各元件匝数相等，所以各元件电势的幅值相等，由于各元件空间位置依次相位差 $\alpha$ 电角度，各元件电势的时间相位差也为 $\alpha$ 角度。



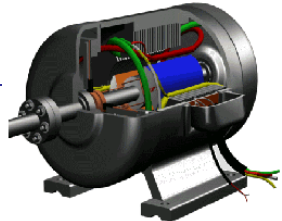
$$E_q = 2R \sin \frac{q\alpha}{2}$$

$$E_c = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

(a) 电势波形  
图

(b) 相量图  
分布因数的推导





分布因数  $k_d$ ——元件组各电势的相量和与代数和的比值

$$k_d = \frac{E_q}{qE_c} = \frac{\sin \frac{qa}{2}}{q \sin \frac{a}{2}}$$

绕组因数  $k_N = k_d k_p$ ，反映分布和短距对电势的影响

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad k_p = \cos \frac{\beta}{2}$$

$$E_q = k_N q E_c = 4.44 f N_c q k_p k_d \phi_m = 4.44 f N_c q k_N \phi_m$$





## 绕组的相电势

### 1. 单层绕组

- 每对极每相有一个元件组
- $p$ 对极电机，每相有 $p$ 个元件组，可以串联、并联或混合连接。如有 $a$ 条并联支路，则每相电势为

$$E_{\phi} = \frac{p}{a} E_q = 4.44 f \frac{pqN_c}{a} k_N \phi_m = 4.44 f N k_N \phi_m$$

$$N = \frac{pqN_c}{a}$$

单层绕组每相串联匝数





## 2. 双层绕组

- 每对极每相有2个元件组
- $p$ 对极电机，每相有 $2p$ 个元件组，可以串联、并连或混合连接。有 $a$ 条并联支路

$$E_{\phi} = \frac{2pE_q}{a} = 4.44 f \frac{2pqN_c}{a} k_N \phi_m = 4.44 f N k_N \phi_m$$

$$N = \frac{2pqN_c}{a}$$

双层绕组每相串联匝数





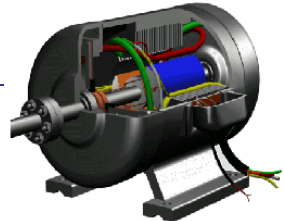
## 每相串联匝数

- 设每槽导体数为 $S$ ，对单层绕组 $N_c=S$ ，双层 $N_c=S/2$

$$N = \frac{pqS}{a}$$

- $N$ 为每相实有串联匝数
- $Nk_N$ 为有效串联匝数， $k_N$ 反映绕组因采用短距和分布而使每相电势减小的程度





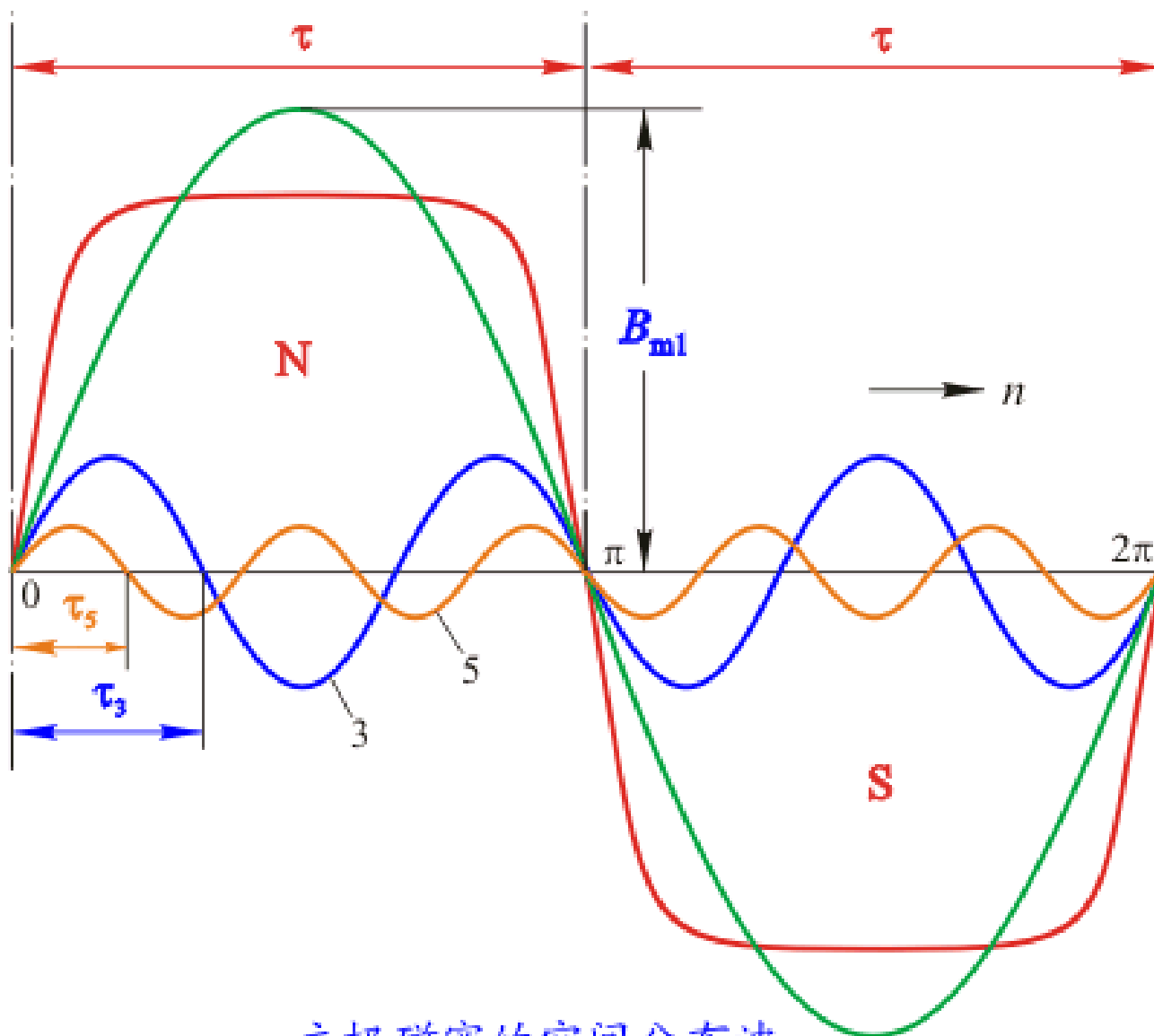
## • 非正弦磁场下绕组的感应电势

在实际电机中，由于磁极的励磁磁动势在气隙中产生的磁场并非正弦波，因此在定子绕组内感应的电动势也并非正弦波，除了基波外还存在一系列谐波。

以三相凸极同步电机为例，磁场是由转子电流激励产生的，气隙磁通密度实际是一个平顶波，可分解出基波和各奇次谐波（由于对称性），基波磁场和各次谐波磁场均随转子而旋转

在定子绕组中不仅感应基波电势，还感应有各次谐波电势。

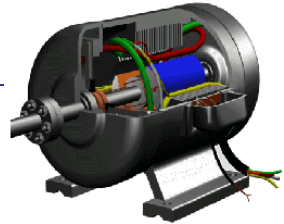




主极磁密的空间分布波







## 谐波电势

$$E_v = 4.44 f_v N k_{Nv} \phi_{mv}$$

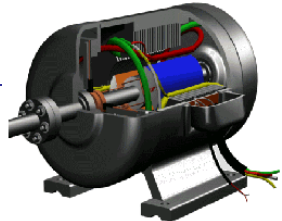
$$p_v = \nu p \quad \tau_v = \frac{\tau}{\nu}$$

$$f_v = p_v \frac{n_1}{60} = \nu \frac{pn_1}{60} = \nu f_1$$

$$\phi_{mv} = \frac{2}{\pi} B_{mv} l \frac{\tau}{\nu}$$

$$k_{Nv} = k_{dv} \cdot k_{pv} = \frac{\sin q \frac{\nu \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2}} \cos \frac{\nu \beta}{2}$$





## •谐波电势的影响

1. 高次谐波电势对电势大小影响较小

### 2. 主要影响电势的波形

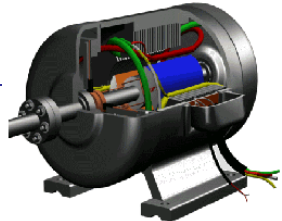
在基波电势上叠加有高次谐波电势使波形变坏  
引起发电机损耗增加，温升增高、效率降低。

在输电线路路上，谐波电势产生高频干扰，使输电线路  
时近的通信设备不能正常工作。

输电线路自身有电感和电容，在某一高频条件下，将  
产生自激振荡而产生过电压。

异步电机中产生有害的附加转矩和损耗

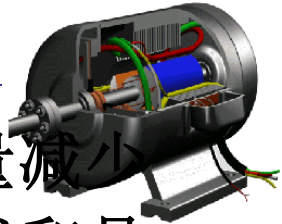




- **消除和减小高次谐波电势的方法**

1. **从谐波性质**：当接成星形连接时，在线电势中不可能出现3次及其3的倍数次谐波电势。
2. **从磁场角度**：使气隙磁场接近正弦分布，如采用适当的极靴宽度和不均匀的气隙长度(磁极中心气隙较小，磁极边缘的气隙较大)、励磁绕组的分布范围
3. **从绕组方面**：采用短距、分布绕组





- 交流绕组的组成原则——获得较大的基波电势，尽量减小谐波电势，且保持三相电势对称，同时考虑节约铜线和具有良好的工艺性。
- 分析绕组的基本方法——槽导体电势星形图，通过槽电势相量的分析可以了解三相绕组的形成和特性。
- 交流绕组的型式很多，应该掌握几种常用三相单层、双层绕组的构成方式和特点。通常小功率电机多采用单层绕组，功率较大的多为双层短距绕组，以削弱高次谐波、改善电势和磁势波形。
- 绕组电势的计算公式与变压器线圈电势的相类似。由于绕组型式不同，相电势计算时必须考虑分布因数和节距因数。
- 由于气隙磁场并不完全按正弦规律分布，存在谐波电势，对电机运行不利。

